

**“ARQUITECTURA Y GESTIÓN DE DATOS DE MEDICIÓN
INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA APLICADO EN
SMART GRID”**

**ARQUITECTURA Y GESTIÓN DE DATOS DE MEDICIÓN INTELIGENTE
DE ENERGÍA ELÉCTRICA APLICADO EN SMART GRID**

ALEXIS RODOLFO QUIROZ TUFIÑO

Egresado de la Carrera Ingeniería Eléctrica

Universidad Politécnica Salesiana

Dirigido por:

ESTUARDO JOSAFAT CORREA ZAPATA

Ingeniero en Sistemas.

Msc. Docencia Universitaria

Profesor de la Universidad Politécnica Salesiana

Carrera Ingeniería Eléctrica

Quito-Ecuador

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Alexis Rodolfo Quiroz Tufiño, autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados así como las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 26 de Febrero del 2015

Alexis Rodolfo Quiroz Tufiño

CI. 1719342204

AUTOR

CERTIFICA:

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos del informe de la monografía, así como el funcionamiento de la “Arquitectura y Gestión de Datos de Medición Inteligente de Energía Eléctrica Aplicado en Smart Grid” realizada por el Sr. Alexis Rodolfo Quiroz Tufiño, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 26 de Febrero del 2015

Ing. Estuardo Correa Zapata

DIRECTOR

DEDICATORIA

Alexis Quiroz T.

*Este trabajo lo dedico a Irma,
La única persona que jamás dudó.*

*A la vida, que golpeó tan fuerte
Pero siempre me puse de pie.*

A todos mis desertores que esperaron mi fracaso.

*Al Amor que me motivó cada despertar,
Que abrigó mi corazón en momentos de tempestad...*

AGRADECIMIENTOS

*A la Ilustre Universidad Politécnica Salesiana,
Por todo el conocimiento y formación humana que me ha brindado.*

*A mi Director, Ing. Estuardo Correa,
Por la ayuda prestada con su conocimiento y experiencia.*

*A Docentes y Maestros
Que intervinieron en el desarrollo de mi carrera universitaria.*

*Compañeros de aula, familiares y amigos
Que aportaron de diversas formas durante los años de estudio.*

*A Dios,
Por los dones, salud y vida.*

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA:.....	III
CERTIFICA:	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
LISTA DE TÉRMINOS	XIII
Resumen	XIV
Abstract.....	XVI
INTRODUCCIÓN.....	XVIII
CAPÍTULO I.....	1
INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA	1
1.1 Medición, recolección y análisis de datos.....	1
1.1.1 Smart Metering (Medición Inteligente).....	1
1.1.2 Medición y recolección de datos	2
1.1.3 Análisis de datos.....	3
1.2 Interacción entre usuarios y centro de operación.....	4
1.3 Retroalimentación de fallas y calidad de energía	7
1.3.1 Retroalimentación consumo de energía:	7
1.3.2 Retroalimentación de fallas:.....	8
1.3.3 Aspectos de la calidad de energía.	9
1.4 Servicios y prestaciones.....	10
1.4.1 Gestión Óptima de Energía en un Smart Grid.....	11
CAPÍTULO II.....	13
SISTEMA DE GESTIÓN DE DATOS DE INFORMACIÓN MDMS	13
2.1 Arquitectura MDMS	13
2.1.1 Arquitectura de comunicación MDMS centralizada.....	14
2.1.2 Arquitectura de comunicación MDMS distribuida.....	16
2.1.3 Arquitectura de comunicación totalmente distribuida	18
2.2 Despliegue optimo de los MDMS	19
2.2.1 Arquitectura de comunicación centralizada	20

2.2.2	Arquitectura de comunicación distribuida	21
2.2.3	Arquitectura de comunicación totalmente distribuida	22
2.3	Escalabilidad del sistema	22
2.3.1	Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS centralizada	23
2.3.2	Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS distribuida.....	24
2.3.3	Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS totalmente distribuida	26
2.4	Evaluación del rendimiento de un MDMS	27
2.4.1	Resultados de rendimiento de las arquitecturas	28
CAPÍTULO III		33
SIMULACIÓN DE ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN		33
3.1	Tasas de envío y recepción de datos del Smart Meter	33
3.1.1	Sistema de comunicación.....	34
3.1.2	Normativas de comunicación.....	36
3.1.3	Definición de datos relevantes.	39
3.1.3.1	Voltaje en un Smart Meter	40
3.1.3.2	Corriente en un Smart Meter	41
3.1.3.3	Frecuencia en un Smart Meter	42
3.1.3.4	Factor de Potencia en un Smart Meter	42
3.1.4	Tráfico de datos en una Smart Grid	44
3.2	Compresión de datos.....	46
3.3	Comparación de rendimiento entre arquitecturas de comunicación.	52
3.3.1	Costo de las Arquitecturas de Comunicación.	53
3.3.1.1	Arquitectura Centralizada	53
3.3.1.2	Arquitectura Distribuida	54
3.3.1.3	Arquitectura Totalmente Distribuida	56
3.3.1.4	Comparación de Arquitecturas.	57
3.3.2	Ancho de Banda para las Arquitecturas de Comunicación.....	59
3.3.2.1	Ancho de Banda para la Arquitectura Centralizada.....	59
3.3.2.2	Ancho de Banda para la Arquitectura Distribuida.....	60
3.3.2.3	Ancho de Banda para la Arquitectura Totalmente Distribuida.....	61
3.3.2.4	Comparación de Arquitecturas.	63
3.3.3	Costo de las Arquitecturas en función de la Velocidad de comunicación.	64
3.3.3.1	Costo de la Arquitectura Distribuida.	64

3.3.3.2 Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida.	65
3.3.3.3 Comparación de Arquitecturas.	66
3.3.4 Costo de las Arquitecturas en función de la distancia	67
3.3.4.1 Costo de la Arquitectura Distribuida.	67
3.3.4.2 Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida.	68
3.3.4.3 Comparación de Arquitecturas.	69
3.4 Gestión de datos.	70
CAPÍTULO IV	74
INDICADORES, RESULTADOS PARA VISUALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE UN MDMS:.....	74
4.1 Dimensionamiento de la red de comunicación	74
4.1.1 Dimensionamiento de la Arquitectura Centralizada.....	75
4.1.2 Dimensionamiento de la Arquitectura Distribuida	76
4.1.3 Dimensionamiento de la Arquitectura Totalmente Distribuida.	77
4.2 Dimensionamiento del Servidor	78
4.3 Dimensionar los registros de la Base de Datos	79
4.4 Proyección de desarrollo del proyecto	79
CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS	85
ANEXOS	88
ANEXO A.....	89
COMPRESIÓN DE INFORMACIÓN PARA ENVÍO A BASE DE DATOS	89
ANEXO B	92
COSTO DE LAS ARQUITECTURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CONCENTRADORES	92
ANEXO C	94
ANCHO DE BANDA POR KILÓMETRO, EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE CONCENTRADORES	94
ANEXO D.....	97
COSTO EN FUNCIÓN DEL VALOR DE VELOCIDAD PROMEDIO DE COMUNICACIÓN	97
ANEXO E	99
COSTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA PROMEDIO	99

ANEXO F	101
GESTIÓN DE DATOS MEDIDOS Y ENVIADOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Sistema típico de medición inteligente.	2
Figura 2: Simulación gráfica para una arquitectura AMI para Smart Meter.	5
Figura 3: Muestra de consumo de energía de 3 hogares.	6
Figura 4: Perfil de usuario con planilla de consumo en 30 días.....	7
Figura 5: Encuesta a usuarios residenciales de Smart Meter.....	11
Figura 6: Arquitectura de comunicación centralizada en Smart Grid (esquema tradicional AMI).....	14
Figura 7: Arquitectura de comunicación MDMS distribuida.....	17
Figura 8: Arquitectura de comunicación MDMS totalmente distribuida.....	18
Figura 9: Comparación de la simulación vs estimación teórica para el resultado del Costo Total.	28
Figura 10: Comparación de la simulación vs estimación teórica para el valor ABDP.29	
Figura 11: Cambio del costo total mínimo en términos de la tasa promedio de tráfico en cada concentrador.	30
Figura 12: Costo mínimo total en términos del despliegue del costo de una MDMS. ..	30
Figura 13: Número óptimo de MDMS vs despliegue del costo.	31
Figura 14: Número de candidatos para la localización de un MDMS.....	32
Figura 15: Formato de transmisión de datos (Medición de energía parcial y total)....	37
Figura 16: Formato de transmisión de datos (Medición de calidad de energía).....	37
Figura 17: Estructura de un Smart Meter con medición de desbalance de fases.	41
Figura 18: Ejemplo de conexión de un transformador de corriente de línea Cero.	42
Figura 19: Diagrama de flujo de un Sistema de Medición Inteligente.	43
Figura 20: Diagrama de un Sistema Eléctrico de Potencia.	47
Figura 21: Tabulación manual de valores medidos por un Smart Meter.	50
Figura 22: Amplitud de mediciones tomadas desde un Smart Meter.	50
Figura 23: Compresión de mediciones a través de la función Wavelet.	51
Figura 24: Recuperación de los datos originales medidos por el Smart Meter.....	51
Figura 25: Recuperación de medidas originales.....	52
Figura 26: Costo de la Arquitectura Centralizada en función del número de Concentradores.	54
Figura 27: Costo de la Arquitectura Distribuida en función del número de Concentradores.	55
Figura 28: Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida en función del número de Concentradores.	56
Figura 29: Costo de las tres Arquitecturas en función del número de Concentradores.	58
Figura 30: Ancho de Banda (Centralizada) en función del número de Concentradores.	59
Figura 31: Ancho de Banda (Distribuida) en función del número de Concentradores.	60

Figura 32: <i>Ancho de Banda (Totalmente Distribuida) en función del número de Concentradores.</i>	62
Figura 33: <i>Ancho de Banda de las Arquitecturas en función del número de Concentradores.</i>	63
Figura 34: <i>Costo (Distribuida) en función de la Velocidad de Comunicación.</i>	65
Figura 35: <i>Costo (Totalmente Distribuida) en función de la Velocidad de Comunicación.</i>	66
Figura 36: <i>Evaluación de las dos Arquitecturas en función de la velocidad.</i>	67
Figura 37: <i>Costo (Distribuida) en función de la Distancia Promedio.</i>	68
Figura 38: <i>Costo (Totalmente Distribuida) en función de la Distancia Promedio.</i>	69
Figura 39: <i>Evaluación del Costo de las Arquitecturas en función de la Distancia Promedio.</i>	70
Figura 40: <i>Administración de cantidad de valores a obtener del Smart Meter en función de la velocidad de comunicación.</i>	72
Figura 41: <i>Administración de cantidad de valores a obtener del Smart Meter en función del número de concentradores conectados a la red.</i>	73

LISTA DE TÉRMINOS

AMI	Infraestructura de Medición Avanzada
RTU	Unidad de Transmisión Remota
MDMS	Meter Data Management System, Sistema de Gestión de Medición de Datos.
OMS	Outage Management System, Sistema de Gestión de Apagones
SIG	Geographic Information System, Sistema de Información Geográfica.
CIS	Consumer Information System, Sistema de Información al Consumidor.
DMS	Distribution Management System, Sistema de Gestión de la Distribución.
ABDP	Accumulated Bandwidth-Dsitance Product, Producto Ancho de banda-distancia Acumulada.
HAN	Home Area Network, Red de Área Local.
PLC	Power Line Communication.
NAN	Neighborhood Area Network, Red de Área de Barrio.
WAN	Wide Area Network, Red de Área Amplia.
GSM	Global System for Mobile Communications, Sistema Global para Comunicaciones Móviles.
GPRS	General Packet Radio Services, Servicio General de paquete vía radio.
3G	Tercera Generación.
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.
IEC	International Electrotechnical Commission, Comisión Electrotécnica Internacional.
ANSI	American National Standards Institute, Instituto Nacional Estadounidense de Estándares.

Resumen

“Arquitectura y Gestión de Datos de Medición Inteligente de Energía Eléctrica Aplicado en Smart Grid”

Alexis Rodolfo Quiroz Tufiño.

alexis.quirozt@gmail.com

Universidad Politécnica Salesiana.

Resumen.- En el presente trabajo se presentan las estructuras esenciales para la construcción de algún tipo de arquitectura de comunicación como son la medición, recolección, almacenamiento y gestión de las lecturas obtenidas desde los Smart Meters. Parámetros básicos de calidad de energía, servicio técnico y comercial. Los criterios de administración o gestión de la energía según la demanda energética, precio y disponibilidad.

Dentro de una Smart Grid se dispone del eje fundamental de la red que es la Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), mediante la cual se pueden desplegar tres arquitecturas de comunicación, a su vez dentro de AMI se tiene el Sistema de Gestión de Medición de Datos (MDMS) con el cual es posible determinar que tipo de arquitectura de comunicación sea Centralizada, Distribuida o Totalmente Distribuida. A cada una de ellas les rigen ecuaciones de comportamiento referente al costo, velocidad de transmisión, datos enviados, escalabilidad del sistema, entre otros factores que determinan la elección de una de ellas para su implementación.

La simulación de las ecuaciones principales permite visualizar la gráfica de cada arquitectura en función de la variación del número de usuarios, distancia y ancho de banda. Esta información resulta de considerable importancia para la gestión de la información, puesto que dependiendo de su relevancia será posible despreciar o no cierta cantidad de lecturas para alivianar registros y velocidad de comunicación.

Finalmente, en base a los resultados de todas las simulaciones se presenta una valoración de los elementos involucrados en la red, esto significa los valores básicos de las arquitecturas, capacidad del servidor y velocidad de comunicación.

Índice de Términos.- Smart Meter, Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), Sistema de Gestión de Medición de Datos (MDMS), escalabilidad, arquitecturas de comunicación, compresión de datos, ancho de banda, velocidad de comunicación.

Abstract

“Architecture and Data Management Smart Metering Electricity Applied to Smart Grid”

Alexis Rodolfo Quiroz Tufiño.

alexis.quirozt@gmail.com

Salesian Polytechnic University.

Abstract.- In this paper the essential structures for the construction of some kind of communication architecture are presented by the measurement, collection, storage and management of the readings obtained from the Smart Meters. Basic parameters of power quality, technical and commercial support. The criteria for administration or energy management as energy demand, price and availability.

Within a Smart Grid is available shaft foundation of the network is Advanced Metering Infrastructure (AMI), through it can deploy the three communication architectures into AMI you have the Meter Data Management System (MSDS) which it is possible to determine the type of communication architecture either Centralized, Distributed or Fully Distributed. In each behavioral equations regards the cost, baud rate, sent data, scalability, among other factors that determine the choice of one of them for their implementation.

The simulation of the main equations allows to visualize the graphics of each architecture based on the variation of the number of users, distance and bandwidth. This information is very important for the management of information, depending on their relevance will be possible to neglect or not a certain number of readings to ease communication speed records.

Finally, based on all the present simulations, an assessment of the elements involved in the network, this means basic values in each architecture, server capacity and records in the database.

Keywords.- Smart Meter, Advanced Metering Infrastructure (AMI) Meter Data Management System (MSDS), scalability, communication architectures, data compression, bandwidth, communication speed.

INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de tecnologías también están los medidores inteligentes conocidos como Smart Meter, este dispositivo cambia la visión y ejecución de trabajo de las lecturas de consumo eléctrico que durante todos estos años se ha venido realizando de forma manual. Un Smart Meter tiene la capacidad de enviar información de medición no solo de consumo de energía, sino que además permite tomar datos de Voltaje, Corriente, Potencias, Frecuencia, entre otros valores. Las lecturas de estas medidas ya no serán manuales, sino que se lo realizarán con comunicaciones de red hacia un centro de operaciones.

Para lograr comunicar datos de un Smart Meter se dispone de una red de comunicación inteligente llamada Smart Grid. Su despliegue consta de una Infraestructura de Medición Avanzada, que abarca desde la generación de datos, su transporte, almacenamiento y gestión de los mismos. Esto implica que se puedan administrar todos los dispositivos inteligentes conectados a la red, gestionar el consumo de energía, comunicación con el usuario en tiempo real y almacenamiento de información de cada Smart Meter para un histórico de consumo que permita al usuario definir la cantidad de energía necesaria.

Una Infraestructura de Medición Avanzada posee varias estructuras o topologías llamadas arquitecturas, que varían según la forma de construcción de la red, ajustando sus elecciones dependiendo de parámetros como distancia, cantidad de usuarios, disponibilidad de ancho de banda, y sobre todo considerando costos de implementación.

La escalabilidad de una arquitectura es muy importante, puesto que las ciudades están en constante crecimiento y esto determina que cada cierto tiempo se demanden mayor cantidad de Smart Meter, por lo tanto debe preverse una red que soporte dicho crecimiento y el costo que en el futuro podría significar esa escalabilidad. Esto significa que la implementación de una arquitectura de comunicación no solo estará sujeta a evaluación de la cantidad de dispositivos a utilizarse en ese momento, sino al crecimiento máximo que podría soportar una ciudad. Por lo tanto el costo de implementación puede ser alto, pero con el tiempo el costo de escalabilidad no resultará ser un desafío.

Dentro de la red de Infraestructura de Medición Avanzada existe un elemento central que es muy importante para la red que es Sistema de Gestión de Medición de Datos, es la base de datos que se encuentra en el centro de operaciones y el lugar donde se toman

las decisiones sobre el uso, precio, almacenamiento, disponibilidad y demanda de la energía eléctrica. Posee además funciones como Sistema de Gestión de Apagones, Sistema de Información Geográfica, Sistema de Información al Consumidor, Sistema de Gestión de la Distribución. Todos estos factores tienen la finalidad de interactuar con los Smart Meters y el centro de operación, o lo que es lo mismo, entre el usuario y la empresa que brinda servicio eléctrico.

Las arquitecturas de comunicación serán analizadas en función del costo de sus implementaciones y este costo a su vez en función de las características topológicas de las ciudades, sus necesidades y diversos parámetros que afectan el costo total. Por lo tanto se presentan tres arquitecturas que son: Arquitectura de Comunicación Centralizada, Arquitectura de Comunicación Distribuida y Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida.

En la arquitectura de Comunicación Centralizada el centro de operaciones esta físicamente ubicado al centro de todos los dispositivos que gestiona las mediciones de los Smart Meter, se tiene el uso de un solo servidor que permite almacenar en un solo lugar todas las mediciones registradas por los medidores inteligentes, esto significa que se pueda tener acceso a la información de manera más rápida. Siendo una desventaja la cantidad de información que se debe almacenar en poco tiempo, creando cuellos de botella si no está correctamente implementado un ancho de banda adecuado para soportar esa cantidad de información.

A continuación esta la Arquitectura de Comunicación Distribuida, la cual posee puntos de gestión de datos con menos privilegios que el centro de operaciones, a estos se les llaman Sistema de Gestión de Medición de Datos Distribuidos, estos centros de gestión se conectan al centro de operaciones principal el cual se convierte en el servidor para almacenamiento y procesamiento de mediciones.

Por otra parte se tiene la Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida, que es más grande que las anteriores, esta estructura posee un centro de operaciones principal y a sus alrededores centros de operaciones distribuidos para cada grupo de concentradores y estos a su vez para grupo de Smart Meters.

Se analizan temas correspondientes a las arquitecturas de comunicación tales como normativas de comunicación, tasas de comunicación, escalabilidad de los sistemas, evaluación y rendimiento de cada una frente a condiciones similares.

Se emularán criterios de gestión de datos como la cantidad de parámetros que se deban medir y la frecuencia que deberán ser tomados. Esto atendiendo a las necesidades

de cada usuario y las previsiones que tenga la empresa distribuidora de energía eléctrica, puesto que no todos los usuarios se aprovecharían de las bondades que presta un Smart Meter dentro de una Smart Grid.

Los resultados finales de la simulación son mostrados en gráficas que pueden determinar la selección de un tipo de arquitectura dependiendo de las variables que puedan existir en campo, es decir, valores como distancia, ancho de banda, numero de concentradores, tipo de gestión, etc.

Finalmente, unos breves y simples cálculos dan a conocer los valores básicos de velocidad de transmisión de la red, capacidad de almacenamiento de los servidores, y valores estándares de comunicación y envío de información de los Smart Meters.

CAPÍTULO I

INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA

En el presente capítulo abordaremos los aspectos que conforman una Infraestructura de Medición Avanzada, que va desde la generación de datos, su transporte, almacenamiento y gestión de los mismos. Esta información almacenada es analizada y direccionada según su utilidad tanto para usuarios como para las empresas generadoras o ambos. Son enviados datos importantes como fallas, reconexiones, voltaje, corriente y tarifas de consumo eléctrico, entre otros. Además se exponen ciertos criterios para evaluar y considerar la calidad de la energía eléctrica, tiempo de respuesta ante fallas y sobre todo los servicios y prestaciones que pueden ser de utilidad para todos los actores del consumo y generación de energía eléctrica.

1.1 Medición, recolección y análisis de datos

Una Advanced Metering Infrastructure; Infraestructura de Medición Avanzada (AMI), consiste en un flujo de datos bidireccional entre el usuario y la empresa de prestación de servicio eléctrico, de tal forma que el usuario final posea información real sobre tiempo de consumo, costo de energía eléctrica y hábitos de uso[1].

1.1.1 Smart Metering (Medición Inteligente)

La medición inteligente o Smart Metering ha sido reconocida como una parte importante de una Smart Grid (Red Inteligente). Un sistema de estas características se construye con los Smart Meters (Medidor Inteligente) que son dispositivos de control y enlace de comunicaciones, estos dispositivos son diferentes de los medidores electromecánicos que usamos actualmente los cuales están sujetos a errores de medición y falta de configuración, sus partes internas son móviles y propensas a desgastarse con el tiempo, estas razones hacen que su uso no ayude a la eficiencia energética. Los datos que son recolectados en los medidores convencionales son de información limitada y con un costo elevado de mano de obra.

Con estos factores en mente los Smart Meters son introducidos en el mercado para brindar un ahorro de energía, gestión de la demanda y eficiencia energética. Puesto que

tiene la capacidad de comunicarse entre sí y ejecutar ordenes de mando local o remoto[2].

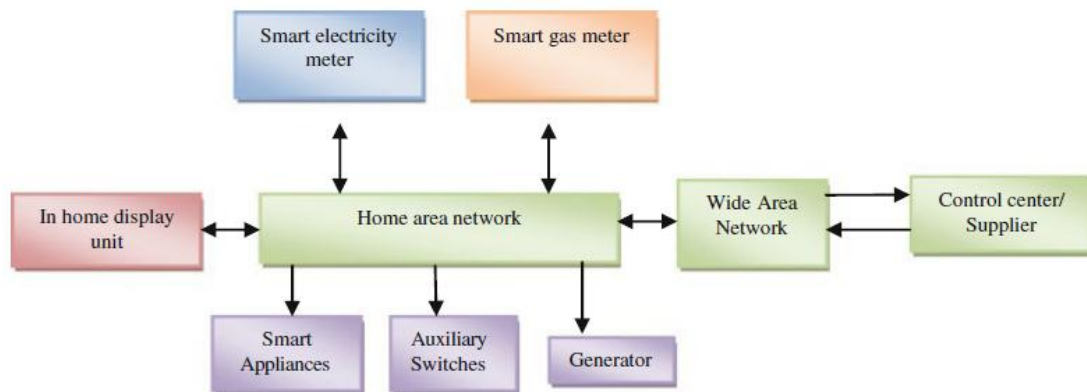


Figura 1: Sistema típico de medición inteligente.

Fuente: Chandima, D. P. (n.d.). *APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY Smart Metering Design and*.

Esta Figura 1 muestra un esquema típico de una medición inteligente pero no solo posee un Smart Meter, sino además tienen equipos o electrodomésticos inteligentes, interruptores auxiliares y comandos de control todos ellos juntos para hacer una casa inteligente. De tal forma que la medición de consumo de energía sea entregada hacia el centro de operaciones y además que sea reflejada en la pantalla del usuario[2].

1.1.2 Medición y recolección de datos

La medición de datos se lo hace desde los equipos ubicados en cada usuario, para este propósito se utilizan los Smart Meter que envían la información del consumo eléctrico de todos los usuarios a los concentradores de la red inteligente. Un Smart Meter posee mayores prestaciones que un medidor de energía convencional, puesto que envía valores de Energía, Corriente, Potencia, Factor de Potencia, Fecha, Hora, Ubicación, Carga de Fases, etc.

Estos datos que envía el Smart Meter son recolectados en un nodo concentrador, el cual recepta la información de varios dispositivos anexados a su red, y envía a una base de datos la información de un grupo de concentradores, este equipo puede considerarse como un servidor por la capacidad y características que debe presentar. Esta base de datos pertenece a la empresa que brinda el servicio eléctrico al usuario[3].

La información obtenida de estas medidas sirve a la empresa suministradora del servicio para la contabilidad del consumo eléctrico, generación de facturas al usuario, seguimiento con estadísticas de consumo y control de calidad de energía que la

compañía entrega al abonado, entre varios aspectos que posee un AMI [4]. Además se puede acceder a un tipo de facturación de energía pre-pagada, semejante a las compañías de telefonía móvil, dichas tarifas permiten controlar el consumo eléctrico, racionar el uso del mismo, lo que se convierte en ahorro para el usuario y la empresa generadora.

Para proceder con la recepción de datos; el ancho de banda de la red de comunicación y la capacidad de almacenamiento en el centro de control debe ser significativamente más alto que la totalidad de los datos receptados cada día. Por lo tanto hay que definir la cantidad y tipo de datos que se desean almacenar mensualmente, diariamente y cada 15 minutos. Los criterios a ser tomados en cuenta son tres:

- El peso de la información a ser enviada,
- Los datos que deben ser almacenados localmente y los que deben ser enviados al centro de operaciones.
- La privacidad del cliente [3].

1.1.3 Análisis de datos.

La información recibida de un Smart Meter, no solo es utilizada para generar el pago por parte del usuario, sino que brinda una visión amplia del comportamiento de ciertas cargas que pueden ser importantes o representativas para el gasto energético. Estos datos permiten hacer un seguimiento y control de ciertos aparatos eléctricos que puedan tener tecnologías de control y comunicación como Zigbee o Wifi, haciendo posible que sean monitoreados en tiempo real y pueda ser gestionada para ciertas horas pico o de mayor consumo energético[5].

Hablando de la empresa suministradora de energía eléctrica, puede tener valores o parámetros de relevante importancia, como son Voltaje de Fase, Corriente, Velocidad de Cambio de Frecuencia, Potencia de líneas, entre otros valores. Esto atiende a la calidad y eficiencia que debe tener la distribución de energía eléctrica a los usuarios finales.

La tecnología AMI es utilizada entre otras funciones, para transportar información en tiempo real al centro de control de energía, incluyendo fallas y tiempo fuera de servicio de la red. Es decir se convierte en una interfaz entre el usuario activo y el centro de control de la empresa que brinda el servicio eléctrico.[5]

Un indicador importante en la información almacenada es el histórico y valores de consumo, puesto que si sus mediciones son muy bajas se podrá anticipar el robo de

energía, o si la estadística de meses anteriores no corresponde al promedio de los últimos meses se podría sospechar una fuga de energía.

Como un aspecto a mencionar es el hecho que en ciertos lugares la facturación será el único objetivo de las empresas distribuidoras, siendo ese el caso las lecturas que se deban requerir de los Smart Meter serán mensuales y de esta forma no se necesitará tener una red de características especiales[3].

Finalmente, al tener estadísticas de consumo y estas varían en el tiempo pueden identificarse varios sucesos, como largas vacaciones de los usuarios, consumo elevado durante todo el día nos indica personas que se quedan en casa todo el día, variaciones intermitentes pueden ser viajes de negocios esporádicos, entre muchas variantes de orden climático, social, etc. Se debe mencionar que el usuario estará muy preocupado por su privacidad respecto a este tipo de monitoreo, para lo cual AMI dispone de la solución:

“para controlar el uso diario de consumo de energía sin comprometer la privacidad del usuario es usar representaciones estadísticas que oculte la información de tiempo¹”.

Lo que puede ayudar a reconocer un comportamiento anormal en el usuario sería valores Máximos, Mínimos, Medios de Energía obtenidos durante un día.[3]

1.2 Interacción entre usuarios y centro de operación

Los desafíos actuales por conservación del ecosistema busca disminuir al máximo las emisiones de carbono en el ambiente, por lo tanto el énfasis para los investigadores e ingenieros está en la creación de una red que permita tener una respuesta acorde a la demanda energética, una gestión eficiente de la red para disminuir las pérdidas en el sistema eléctrico y el despliegue óptimo de los recursos energéticos. Por lo tanto, la red inteligente está siendo considerada como la solución a estos problemas, puesto que es la interacción y convergencia de dos tecnologías: la ingeniería de comunicaciones y la ingeniería de Sistemas Eléctricos de Potencia.

Lo antes mencionado anuncia la versatilidad y eficiencia que debe buscarse en una Infraestructura de Medición Avanzada, teniendo varios parámetros para ser analizados antes de su constitución y construcción[4].

¹ Lu, N., Du, P., Guo, X., & Greitzer, F. L. (2012). Smart Meter Data Analysis, 1–6.

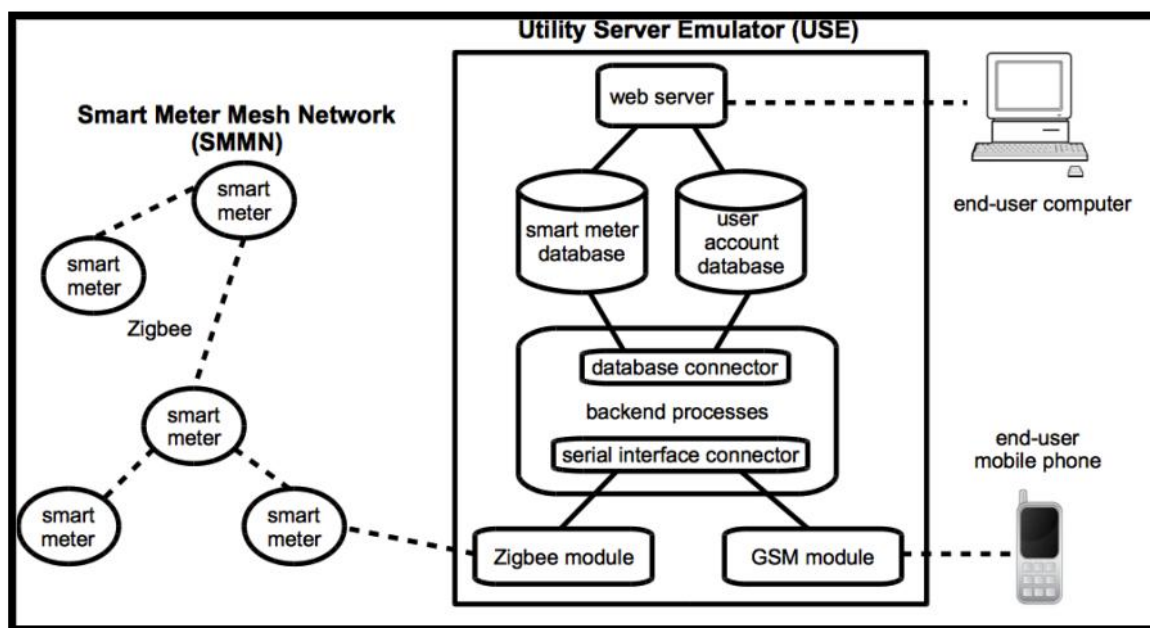


Figura 2: Simulación gráfica para una arquitectura AMI para Smart Meter.

Fuente: Pedrasa, J. R. I., Iii, L. V., Dumlao, M. L., & Pedrasa, M. A. A. (2014). *Design and Implementation of an AMI Emulator for User Feature Studies*, 366–371.

Cuando se dispone de una red cuyo centro de operaciones tenga una cercanía relativa, no hay problemas de distancia, pérdidas de información, ancho de banda, entre otros, de tal forma que la información que envía el Smart Meter puede ser valorada en su totalidad, sin embargo cuando se incrementa la cantidad de usuarios y se eleva la distancia del centro de operaciones hacia el abonado se generan problemas de pérdida de información y saturación de la red inteligente.

Es por eso, que debido a la cantidad de abonados, la distancia entre el Smart Meter y el centro de operaciones, la afluencia de información varía según las necesidades y la funcionalidad del sistema, puesto que no todos los datos son realmente importantes al día a día. Esto se traduce en un ahorro de recursos económicos referente a las comunicaciones, y mientras se puedan reducirlos al máximo será una red inteligente más rentable[4].

En otros aspectos, AMI evita la presencia física de personal de la empresa que suministra el servicio eléctrico al usuario, puesto que la medición en sitio del consumo, acciones de conexión y desconexión del servicio y la gestión para la restauración del mismo ahora pueden ser soportados por el monitoreo en tiempo real que ejecuta el AMI, además del control de precios de la energía, permitiendo a las empresas de servicios públicos puedan implementar una acción directa en la gestión de la demanda y

responder rápidamente frente a las variaciones [6]

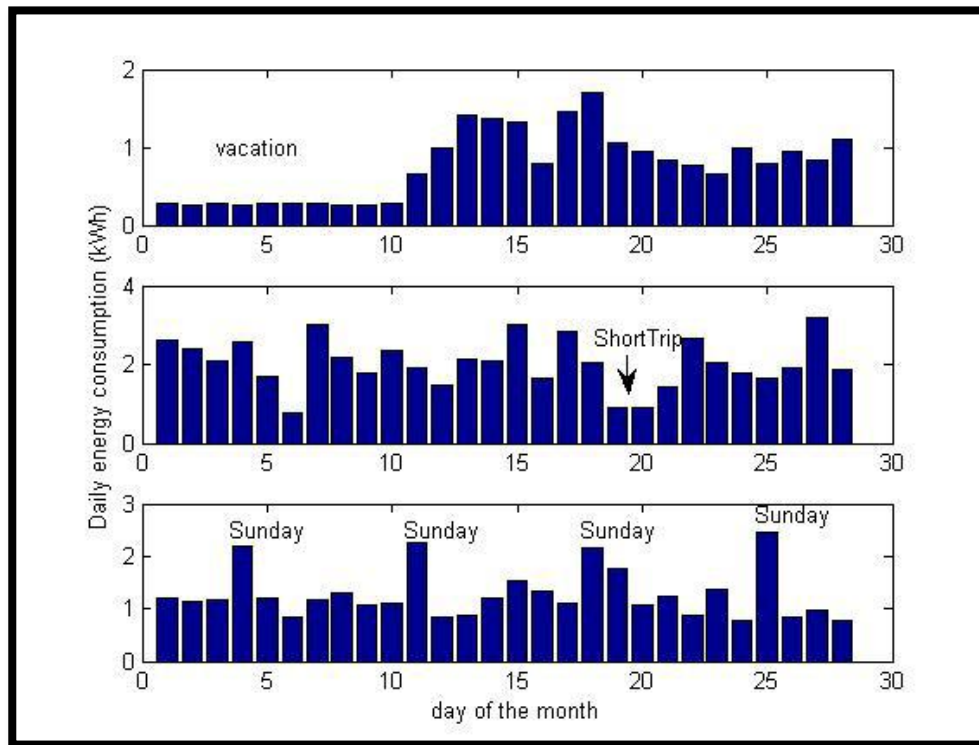


Figura 3: Muestra de consumo de energía de 3 hogares.

Fuente: Lu, N., Du, P., Guo, X., & Greitzer, F. L. (2012). *Smart Meter Data Analysis*, 1–6.

La figura muestra una estadística semanal de varios usuarios que tienen una cultura diferente de consumo, los cuales son reflejados y analizados dentro de AMI. Este tipo de información es de principal interés para las empresas distribuidoras del servicio eléctrico, puesto que se pueden monitorear posibles fallas o pérdidas de energía.

Por otra parte tenemos la interacción con el usuario, el cual puede acceder a su información de consumo desde mensajes de texto, correos electrónicos, aplicaciones móviles o aplicaciones web, esto con la finalidad de controlar su consumo, administrar mejor sus recursos energéticos y en ciertos dispositivos poder controlarlos de forma remota por la misma vía que recibe sus notificaciones[4].

Una aplicación web puede tener entre sus opciones la capacidad de seleccionar el tipo de información que deseamos visualizar, es decir, podemos solicitar información diaria, semanal, mensual o entre periodos determinados de tiempo, de tal forma que se vuelve una herramienta que el usuario accede y obtiene información para tomar decisiones o correctivos de consumo, generando además una cultura de ahorro energético y conservación de recursos energéticos. La siguiente gráfica muestra una simulación de

una cuenta de usuario.

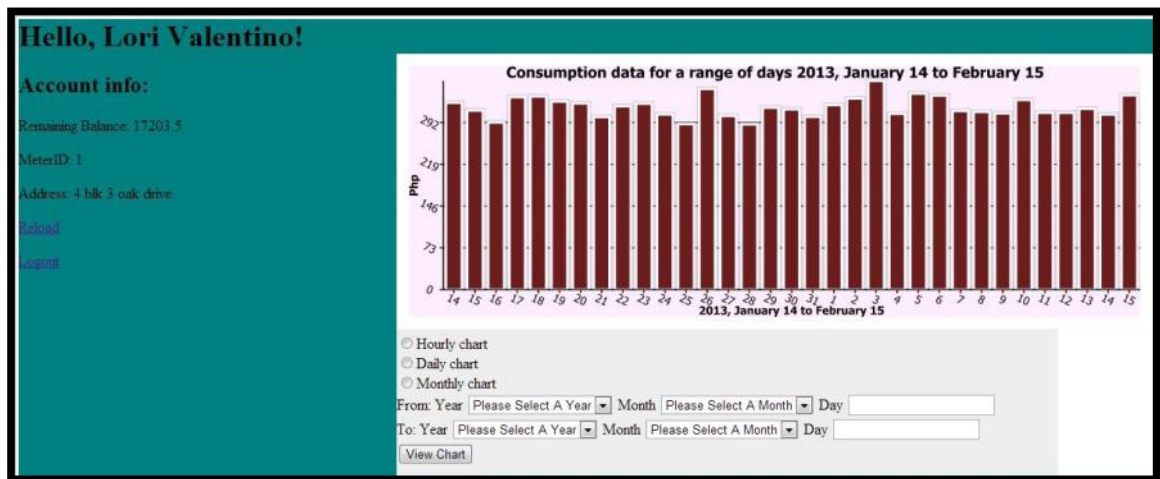


Figura 4: Perfil de usuario con planilla de consumo en 30 dias.

Fuente: Pedrasa, J. R. I., Iii, L. V., Dumlao, M. L., & Pedrasa, M. A. A. (2014). *Design and implementation of an AMI Emulator for User Feature Studies*, 366–371.

Todo lo antes expuesto muestra una visión de lo que puede hacer un AMI, sin embargo no es su potencial total, aun hay mucho mas por investigar y aportar para estas redes de comunicación inteligentes y su vinculación con el generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

La interacción entre el usuario y la empresa que suministra el servicio eléctrico se da cuando la información del abonado puede ser mostrada o expuesta en una aplicación en tiempo real, siendo los mismos datos que poseen tanto el usuario como la empresa.

1.3 Retroalimentación de fallas y calidad de energía

Una de las utilidades que debe tener una Smart Grid es la cualidad de auto-recuperación, esto quiere decir que cuando la red inteligente detecta una falla procura localizarla y determinar su origen para poder intentar una reconexión a la brevedad posible. Estas fallas también representan valores informativos tanto para las empresas de suministro eléctrico como para los usuarios.

Se debe tener en cuenta que las empresas que prestan servicio eléctrico buscan la fiabilidad y confiabilidad de su red de distribución, puesto que los intervalos de tiempo que permanece fuera de línea representa una pérdida económica muy elevada. Generando una baja de credibilidad en los usuarios[6].

1.3.1 Retroalimentación consumo de energía:

Existen varios tipos de retroalimentación de energía, los mismos que pueden ser seleccionados de acuerdo a las necesidades del centro de operaciones. A continuación se enumeran varias características:

- Facturación estándar.- medición mensual, carece de información detallada sobre los aspectos del consumo energético, su único fin es la facturación.
- Facturación Mejorada.- proporciona información más detallada acerca de los patrones de consumo de energía, incluye estadísticas comparativas con el mes más reciente y entre otros usuarios.
- Retroalimentación Estimada.- esto es posible cuando los electrodomésticos o dispositivos instalados están conectados a una red de gestión energética dentro del hogar, de tal forma que el resultado del consumo eléctrico no solo es de la residencia en general sino de los equipos conectados en ella. Con esta herramienta es más factible monitorear sus cargas de forma individual (las que estén conectadas a la red).
- Retroalimentación Diaria-Semanal.- este control aplica a los usuarios, pues suelen tomar medidas y los registran en tiempos determinados, pueden ser semanales o diarias a manera de auditoría o control a la empresa que suministra el servicio de distribución energética.
- Retroalimentación en tiempo real.- son abonados que poseen equipos que permiten visualizar los valores de energía en el hogar y son proporcionados en tiempo real.
- Retroalimentación en tiempo real plus.- este tipo de información es muy semejante al apartado anterior, con la salvedad que también tiene la posibilidad de mostrar costos del consumo de energía[7].

1.3.2 Retroalimentación de fallas:

Existen varios métodos para localización e identificación de fallas, los mismos que se dividen en categorías basadas en el análisis de fallas, análisis de ondas, entre otros. A continuación se detalla su descripción:

- Localización de fallas.- esto lo hacen en base a la supervisión de la corriente de falla, y esto lo lleva a una base de datos que almacena en las subestaciones de distribución para todos los alimentadores usando Unidad de Transmisión

Remota (RTU) y con esta información es posible determinar su ubicación o distancia estimada.

- Impedancia de falla.- como una de las maneras más efectivas son los monitores de calidad de potencia, que son instaladas en las subestaciones de distribución para recoger datos de Voltaje y Corriente que se necesitan para los métodos de cálculos de impedancias.
- Caídas de tensión distribuidas.- se basa en un sistema de localización de fallas en una técnica de vacío de tensión, que tiene relación con la caída de tensión para la localización de averías. Este método consisten en al menos tres puntos de medición de Voltaje a lo largo de una línea de distribución.

Sea cual fuere el método de información de fallas, está basado en algoritmos matemáticos que tienen la finalidad de aproximarse al punto más preciso sobre el origen de la falla y su localización. Referente a las redes AMI, deben esperarse ángulos de fase asociados a fallas, para determinar acciones respecto a su reconexión o evaluación de fallas[8].

1.3.3 Aspectos de la calidad de energía.

Dentro de los elementos a ser considerados para la evaluación de la calidad de energía son los niveles de voltaje, las perturbaciones que presente la red eléctrica y el factor de potencia. Siendo la empresa distribuidora la encargada de tomar datos y llevarla a una base de datos y determinar las medidas necesarias para hacer las compensaciones o correcciones correspondientes[9].

La normativa aplicada a nuestro país es la siguiente:

“La Calidad de Servicio se medirá considerando los aspectos siguientes:

Calidad del Producto:

Nivel de voltaje

Perturbaciones de voltaje

Factor de Potencia

Calidad del Servicio Técnico:

Frecuencia de Interrupciones

Duración de Interrupciones

Calidad del Servicio Comercial:

Atención de Solicitudes

Atención de Reclamos

Errores en Medición y Facturación²”

En tal virtud la calidad del servicio de distribución eléctrica se evaluará en función de la frecuencia y duración total de las interrupciones o fallas. Por lo tanto dentro de AMI, ésta sensación del usuario será más perceptible puesto que tendrá esa información en su aplicación móvil [9]

1.4 Servicios y prestaciones.

Entre las prestaciones que puede presentar un AMI se tienen las siguientes:

- Un sistema de gestión genera ahorro en costos operativos.
- El usuario puede evaluar las cargas que podría desconectar en horas pico, generando un beneficio compartido.
- Con la opción de energía pre-pagada existe ahorro en costos de operación.
- Al poder gestionar la demanda es posible optimizar la oferta energética. Teniendo como objetivo mejorar las oportunidades de comercialización.
- Mejora el servicio al cliente, de forma remota y menos presencial[10].

La finalidad de cualquier empresa que suministra servicio eléctrico es medir, proteger, administrar y despachar la energía. La clave para la gestión de esta información está en controlar el flujo de energía a través de la información, es decir todos los datos recolectados, almacenados y analizados son muy importantes para una generación eficiente[11].

En los Estados Unidos de América, los Smart Meter y sus redes inteligentes no han tenido una incidencia considerable entre los usuarios, razón por la cual los servicios públicos se han comprometido en promover su uso, esto en base a los resultados obtenidos en el ahorro de energía y beneficio en los costos de generación. Una limitante a este respecto es la distinción de ahorro en servicios públicos y usuarios particulares puesto que solo se han determinado valores generales de ahorro de energía y costos de generación de la misma, sin poder determinar en porcentajes o valores reales cuanto de ese ahorro corresponde a usuarios y cuanto a los servicios públicos como por ejemplo

² Regulación No. CONELEC 004/01; CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN.

alumbrado urbano.

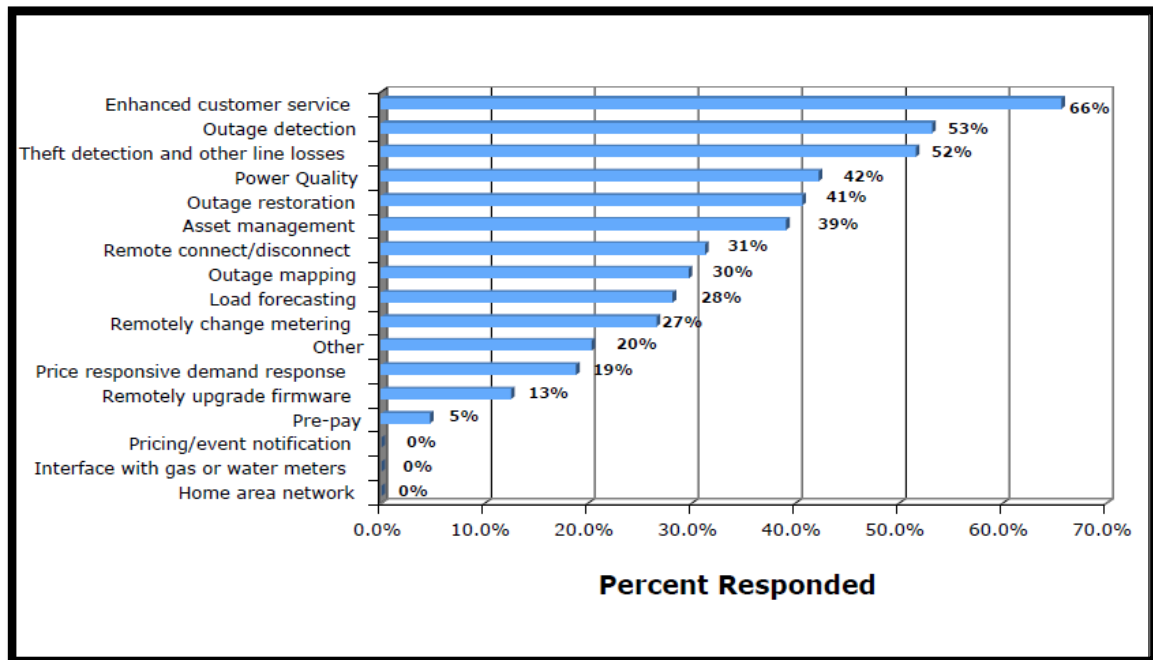


Figura 5: Encuesta a usuarios residenciales de Smart Meter³.

Fuente: Ehrhardt-martinez, A. K., & Donnelly, K. A. (2010). *Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs : A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities*.

La figura 5 muestra valores porcentuales de aspectos muy significativos a ser tomados en cuenta por parte de las empresas distribuidoras, por ejemplo:

- El 66% afirma que tiene una mejor atención al cliente.
- EL 53% menciona que tiene una mejor gestión en detección de cortes de luz.
- Un 52% ha podido detectar robo de energía eléctrica.
- El 31% se siente satisfecho con la conexión y desconexión remota, etc.

Estos valores fueron tomados de usuarios residenciales, sin embargo la aplicación del concepto a usuarios comerciales o industriales es válida, puesto que los beneficios llegan a ser muy similares y cada vez mas están ganando terreno entre usuarios residenciales, comercios o industrias[10].

1.4.1 Gestión Óptima de Energía en un Smart Grid

Los diseños de sistemas de gestión de carga y control de la demanda energética están pensados en la reducción o regulación de la demanda pico, estabilizar la frecuencia del

³ Muestras tomadas de Smart Meters instalados en Estados Unidos de América[10].

sistema eléctrico de potencia, y disminuir los costos de la generación de energía eléctrica. Este último aspecto se logra cuando los usuarios residenciales cambian o mejoran su patrón de uso de energía, para lo cual existen varios regímenes de tarifas que pueden ser aplicados para este caso, tales como:

- Precios en Tiempo Real.- este valor económico se generará cada hora o menos, reflejando el verdadero costo de la electricidad, esta información puede ser actualizada cada cierto tiempo y reflejada en la pantalla del Smart Meter o en alguna aplicación que el usuario disponga.
- Tiempo de Uso de Fijación de Precios.- este criterio se basa en los sucesos que pasan durante el día de 24 horas, pues se dividen en grupos muy marcados como son los picos altos de demanda y los momentos de menor consumo. Esta forma de medición puede alertar solo en los momentos de mayor gasto energético y puede ser segmentado por las estaciones del año o de forma anual.
- Precios Críticos Altos.- esto significa que la tarifa del consumo eléctrico no es constante, pues varía su costo dependiendo de la demanda más alta. Para lo cual los consumidores serían notificados para su incremento de valor.
- Fijación de Precios.- esto sucede con 24 horas de anterioridad, donde le empresa generadora publica o informa una lista de precios de las tarifas según los horarios del día. Generalmente los precios varían según los diferentes lugares, geografía, estaciones del año, etc. Esta información se va actualizando cada hora[2].

La fijación de un precio en tiempo real es el método que más ventajas tiene, puesto que existe un eficiente ahorro económico, ambientales y de generación de energía. El hecho de ver un valor incrementando con el pasar de las horas puede hacer que el usuario mida el consumo de ciertos dispositivos que podrían no estar encendidos.

CAPÍTULO II

SISTEMA DE GESTIÓN DE DATOS DE INFORMACIÓN MDMS

Dentro de las arquitecturas de comunicación que contiene AMI, están las comunicaciones centralizada y distribuidas, con la finalidad de obtener, recopilar y gestionar todos los datos que envíe el universo de los Smart Meter. Con la responsabilidad de filtrar el tipo de información que debe llegar a cada nivel de la arquitectura de comunicación correspondiente.

La implementación de estas redes inteligentes tienen un costo que varía según el tipo de arquitectura, su aplicación, distancia, ancho de banda, cantidad de Smart Meters, entre otros parámetros. El objetivo es tener un algoritmo que minimice el impacto económico para el desarrollo de una determinada arquitectura. Además de la búsqueda de escalabilidad de los sistemas en función de los parámetros que serán descritos.

2.1 Arquitectura MDMS

Cuando se habla de un Meter Data Management System, Sistema de Gestión de Medición de Datos (MDMS), se hace referencia a una de las partes más importante de una red inteligente AMI, por ser el ente encargado de la gestión de los datos almacenados.

Siendo el MDMS el corazón de la red AMI, es quien se ocupa de administrar los datos que ingresan al centro de operaciones mediante los concentradores, para el procesamiento y almacenamiento de datos de la manera más adecuada según su topología. Al estar dentro de una misma red es posible acceder a la información de registros de una forma rápida y fácil[1].

Un MDMS a más de ser una base de datos que realiza el almacenamiento y gestión de los mismos a largo plazo para las enormes cantidades de datos y eventos de uso, cuenta con herramientas de análisis que permiten la interacción con los sistemas de operación y gestión, incluyendo:

- Outage Management System, Sistema de Gestión de Apagones (OMS) enviando medidas de voltaje y corriente previos a estos sucesos[12],
- Geographic Information System, Sistema de Información Geográfica (SIG) mediante el envío del lugar de instalación permite localizar las direcciones de los abonados con total precisión[12],

- Consumer Information System, Sistema de Información al Consumidor (CIS) que gestiona la información de facturación de servicios eléctricos comerciales y residenciales[12],
- Distribution Management System, Sistema de Gestión de la Distribución (DMS) que proporciona la gestión de calidad de la energía; además de la previsión de carga en base a datos de medición inteligente[12].

Sumando a esto, un MDMS es la unidad encargada de la gestión y procesamiento de datos dentro del AMI, siendo su principal tarea establecer una arquitectura escalable alrededor de un MDMS y que tenga la capacidad de interactuar con los Smart Meters y el centro de operación, es decir, entre el usuario y la empresa de servicio eléctrico[13].

2.1.1 Arquitectura de comunicación MDMS centralizada.

Las redes inteligentes utilizan AMI para recopilar y procesar la información proveniente de los Smart Meters, a su vez AMI emplea la base de datos MDMS para almacenarlos y gestionarlos.

Una potencialidad de MDMS es que incluye herramientas de análisis, procesamiento y almacenamiento de datos, que le permiten al sistema de operación y gestión interactuar con estas herramientas y escoger el tipo y cantidad de datos que se necesitarán de acuerdo a la ocasión[1].

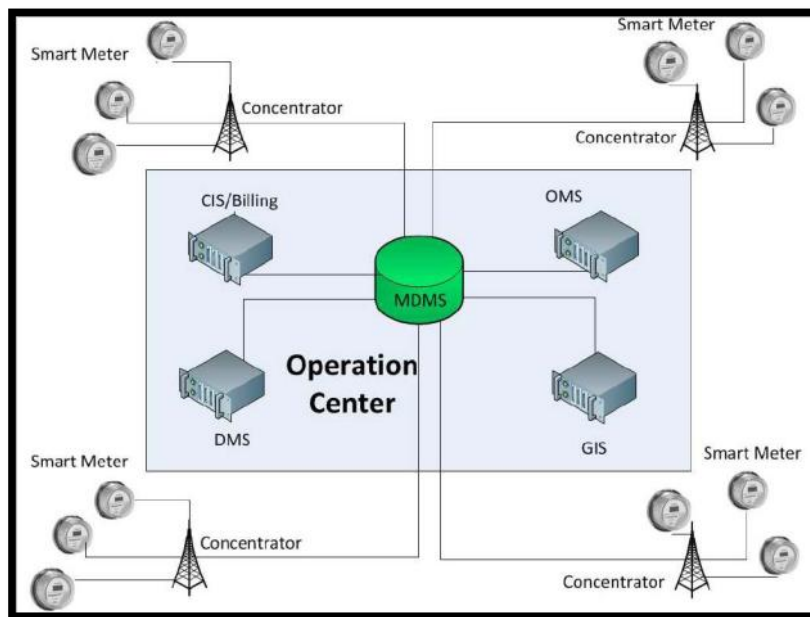


Figura 6: Arquitectura de comunicación centralizada en Smart Grid (esquema tradicional AMI)

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). Scalable Distributed Communication Architectures

En una arquitectura centralizada, el MDMS se encuentra en el centro de las operaciones, manteniendo toda la información de los concentradores y estos a su vez los de cada usuario, por lo tanto la cantidad de datos pueden ser desorbitantes. El uso de un solo servidor hace que el procesamiento de información sea rápido, sin embargo el sistema no podrá sostener un incremento considerable de usuarios, por lo tanto esta arquitectura no puede ser fácilmente escalable, lo que implica una gran limitante[1].

La limitada escalabilidad de esta arquitectura atiende a las siguientes características:

- Con el incremento de carga o de usuarios también incrementa la información enviada por los Smart Meters, esto genera cuellos de botella al momento de la gestión de datos, causando retraso en la comunicación y esto a su vez pérdida de información.
- El tratamiento de datos abundantes se verá limitado al tener incremento de usuarios debido a que no será sustentado por un solo MDMS.
- El uso de recursos de comunicación será relacionado con la distancia y cantidad de información que se envíe. La distancia entre el concentrador y el MDMS centralizado puede ser muy grande, por lo tanto por ese trayecto debe viajar la información de cada Smart Meter, sin embargo no todos esos datos que envía el dispositivo de medición son necesarios, esto se traduce en pérdida de recursos de comunicación[1].

En una red que utiliza este tipo de arquitectura se recogen los datos medidos a través del MDMS centralizado haciendo que el sistema no sea escalable en la mayoría de sus funciones. Esto se debe a que la información debe viajar a través del MDMS centralizado, causando cuellos de botella con la información que pasa a través de toda la red. Entre las razones por las que no debería ser un sistema escalable están las siguientes:

- Términos de rendimiento.- hace referencia al abundante tráfico de información que pasará a través del MDMS, pudiendo en algún momento colapsar la red, en especial cuando esta cerca del centro de operaciones. Además de un retardo considerable o pérdida de datos relevantes cuando la congestión ocurre.
- Términos de procesamiento de datos.- debido a la cantidad de información que posee la red MDMS el procesamiento de datos centralizado cada vez se vuelve

menos factible.

- Términos de recursos de comunicación utilizados.- cada mensaje o dato que transmite el Smart Meter es enviado a través de un mismo camino hasta llegar a un único MDMS, esto provoca una enorme pérdida de recursos de comunicación, pues la red debe estar diseñada para soportar todo el tráfico de información, lo cual disminuye la capacidad de escalabilidad deseada.

Por las razones expuestas se presenta la arquitectura de comunicación distribuida como una alternativa frente a estos aspectos mencionados, pues reduce significativamente tanto el ancho de banda necesaria para la comunicación como la distancia entre el Smart Meter final hasta su primer MDMS[12].

Un factor muy importante a tener en cuenta dentro de esta arquitectura es la latencia⁴ puesto que su presencia debe ser determinada en el cálculo de su infraestructura constructiva para definir los parámetros y características de la red [14].

2.1.2 Arquitectura de comunicación MDMS distribuida.

En esta arquitectura cada MDMS recoge la información de los concentradores que están en su territorio procesando los datos y almacenándolos, de tal forma que el centro de operaciones general requiere solo una fracción de la información recopilada. Esta selección de datos ahorra una cantidad significativa de espacio en el ancho de banda, de manera que elimina la posibilidad de atascamiento de información o un cuello de botella en el centro de operaciones[1].

⁴ Se entiende como latencia a la suma de retardos temporales dentro de una red. Este retardo se debe a la transmisión de datos. Este tiempo dependerá del tamaño de los paquetes transmitidos y el tamaño de los buffers dentro de los equipos de conectividad.

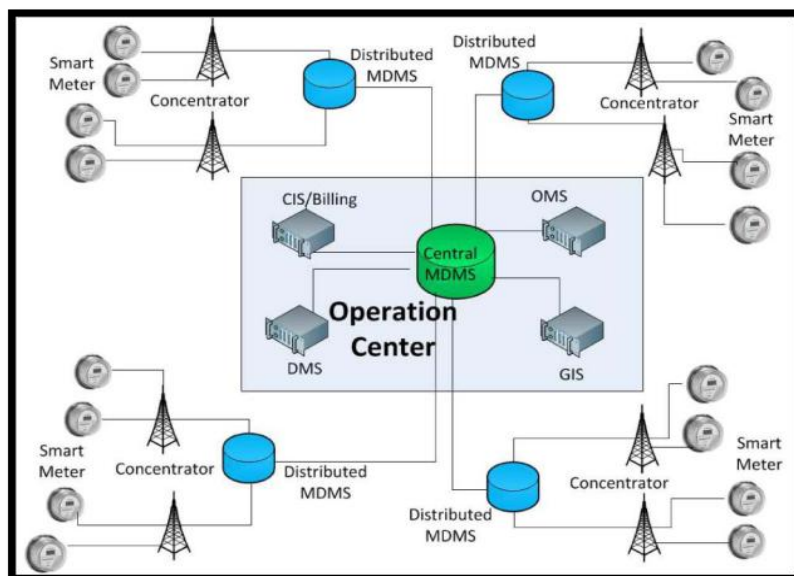


Figura 7: Arquitectura de comunicación MDMS distribuida

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid.*

Como se muestra en la Figura 7, fuera del centro de operaciones existen los MDMS necesarios para un grupo de concentradores y a su vez de Smart Meters, siendo estos MDMS distribuidos en el espacio físico del territorio, los responsables del almacenamiento y procesamiento de los datos obtenidos solo de su área de recopilación.

Esta distribución física de los MDMS hace que estén cerca de los Smart Meters; lo cual constituye en una diferencia de la arquitectura centralizada. Además de la distancia reducida, ahora existe un ancho de banda para las comunicaciones, de menor capacidad debido a que hay datos en bruto que se quedan en la primera fase de los MDMS, pues ellos al gestionarlos enviarán solo los datos relevantes hacia el centro de operaciones.

La inversión en el sistema comunicación dentro de una arquitectura distribuida es menor que la inversión que se tendría que hacer si fuera una arquitectura centralizada, pues los niveles de comunicación son abundantes y pesados. Dentro de la arquitectura distribuida solo una porción de la información es enviada. Por ejemplo en un corte de energía no programado, solo es enviado el dato del momento y lugar donde hubo anomalía de Voltaje y Corriente, mas no una medición constante y diaria. Esto se convierte en una gran potencialidad del sistema distribuido[12].

2.1.3 Arquitectura de comunicación totalmente distribuida

Para la arquitectura totalmente distribuida, existen MDMS distribuidos en sectores o zonas territoriales y un solo centro de operaciones general. Cada centro de operación distribuida posee un operador y un servidor de gestión de datos. El costo de la comunicación entre el centro de operaciones general y los centros de operaciones parciales se reduce puesto que se necesita un ancho de banda constante especialmente entre el servidor distribuido y el centro de operación principal.

Al centro de operaciones general son enviados solo los resultados de anomalías o informes de funcionamiento, el resto de información se queda en los centro de operaciones distribuidas. Por esta razón se requiere un ancho de banda de baja velocidad y valor constante para este propósito[1].

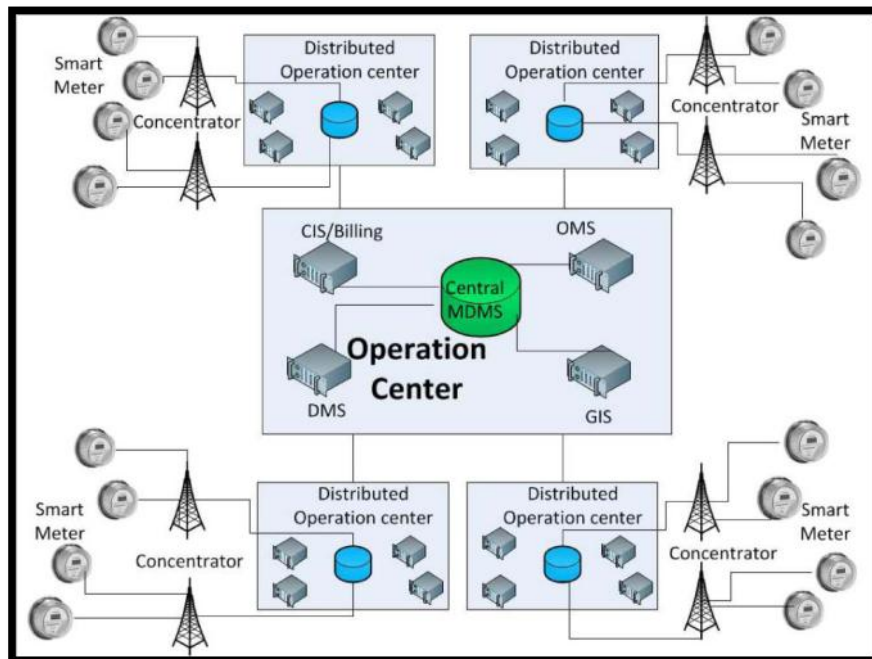


Figura 8: Arquitectura de comunicación MDMS totalmente distribuida.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid.*

La arquitectura totalmente distribuida puede resultar ser más económica que la anterior arquitectura distribuida, esto se debe a que tanto el centro de operaciones seccional como el servidor están descentralizados, como claramente se lo puede notar en la Figura 8.

Para esta nueva arquitectura están físicamente juntos el servidor operacional y el

gestionador de distribución MDMS, por lo tanto ese costo ya no existiría. Ahora la comunicación entre los centros de operaciones distribuidos hacia el centro de operaciones general será constante, no dependerá del incremento de Smart Meters ni del número de concentradores anexados. Esto permitirá tomar decisiones por cada sector y manejar información de forma local en cada centro de operaciones distribuido sin la necesidad de que esa información llegue hasta el centro de operaciones general.

La única información que deberá ser enviada y analizada por el centro de operaciones general será el resumen de la calidad de energía del usuario en la zona administrada por el MDMS distribuido correspondiente a la zona. Es decir que los datos se deben enviar desde un OMS distribuido hacia un OMS centralizado, lo cual se convierte en una constante, siendo independiente del número de usuarios que tenga la red distribuida[12].

2.2 Despliegue optimo de los MDMS

En la arquitectura de comunicación distribuida se tienen dos partes de evaluación, la recolección de información y el uso de información. A continuación mostramos los parámetros y variables que se usarán para calcular y simular el algoritmo[12].

- λ_i Tasa de generación de mensajes en cada concentrador i en la unidad de megabits / segundo (Mbps).
- d_{ij} Distancia desde el concentrador i a j en la unidad de MDMS de kilómetros (km).
- C_{ij} Distancia de MDMS j al centro de operaciones.
- x_{ij} Indicador: Ya sea concentrador i está conectado a MDMS j .
- A El tamaño de un área cuadrada. $A=a^2$.
- N Número total de concentradores.
- M Número total de localización de candidatos para MDMS.
- α La relación de los datos refinados que necesitan los servicios operativos y de gestión a través de los datos brutos recogidos por MDMS.
- β Costo unitario del producto ancho de banda por distancia. ($Mbps \times km/\$$)
- γ El ancho de banda necesario para la información intercambiada entre un servidor distribuido y un servidor centralizado.
- y_j Si se elige la ubicación candidato j desplegar una MDMS.
- F_j El costo de la implementación de una MDMS en la localización j .

La primera parte de la arquitectura de comunicación distribuida corresponde a la recolección de información, la cual considera el costo de su topología tomando en cuenta el tramo que va desde el concentrador hacia el correspondiente MDMS distribuido. Para un concentrador determinado conectado hacia un MDMS puede ser expresado como:

$$\lambda_i d_{ij}$$

Para un análisis total se deben considerar la contribución de todos los concentradores de la Smart Grid. En esta etapa se descuida el costo desde el Smart Meter hacia el concentrador por encontrarse relativamente cerca. La fórmula matemática que se usa es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \lambda_i d_{ij} x_{ij}$$

La segunda parte de la arquitectura de comunicación distribuida corresponde al uso de información, la cual considera el costo de su topología tomando en cuenta el tramo que va desde cada MDMS hacia el centro de operaciones. En esta etapa se descuida el costo desde el Smart Meter hacia el concentrador por encontrarse relativamente cerca. La fórmula matemática que se usa es la siguiente:

$$\sum_{j=1}^M \alpha \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} C_j$$

Esta expresión se ve obligada a cumplir una condición: que el concentrador i esté conectado hacia el MDMS j [12]. Solo así podrá ser evaluada esta fórmula para el cálculo del costo.

2.2.1 Arquitectura de comunicación centralizada

Las fórmulas matemáticas mencionadas anteriormente pertenecientes a las arquitecturas distribuidas, no existen para la arquitectura de comunicación centralizada, puesto que el MDMS está dentro del centro de operaciones por lo tanto es un costo que se desprecia por estar juntos.

Esta arquitectura, por ser centralizada, para este aspecto no le es posible tener un análisis de optimización de comunicación dentro del sistema, por lo tanto se debe evaluar y considerar su uso y proyecciones futuras en el diseño inicial[12].

2.2.2 Arquitectura de comunicación distribuida

Siguiendo con la intención de encontrar la distancia más corta de la comunicación para la migración de datos, existe un parámetro de desempeño para medir la escalabilidad de una arquitectura para MDMS en una red inteligente, esto es Accumulated Bandwidth-Dsitance Product, Producto Ancho de banda-distancia Acumulada, (ABDP). El término ABDP se utiliza en el contexto de la comunicación con fibra óptica que se define como el producto de la longitud de un enlace de fibra óptica y su tasa de datos máxima. En el caso del sistema AMI de red inteligente, se utiliza el producto ABDP para medir el total de recursos que se utilizan para apoyar las demandas de comunicación [13].

Como resultado del problema de optimización para minimizar el costo del sistema se formula lo siguiente:

$$\text{Min } \beta \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \lambda_i d_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^M \alpha \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} C_j \right) + \sum_{j=1}^M F_j y_j, \quad (1)$$

Las restricciones de uso son:

$$\sum_{j=1}^M x_{ij} = 1, \quad (2)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ or } 1, \quad (3)$$

$$y_j = 0 \text{ or } 1. \quad (4)$$

Las formulaciones presentadas son importantes en la etapa de planificación ya que el objetivo es minimizar el costo total.

Estos parámetros de optimización proporciona la mejor localización para la instalación de un MDMS. Puesto que se evalúan los costos en base a la distancia y características especiales para la comunicación, por lo tanto el valor se define según esa variable. La condicionante $y_j = 0 \text{ or } 1$, cuando resulta ser 1 debe ser elegido puesto que cumple con las condiciones de restricción, que consiste en hacer cumplir que un concentrador debe ser conectado sólo a un único MDMS, por lo que los datos recogidos del mismo Smart Meter o varios Smart Meters de la misma zona se almacenan juntos y pueden ser datos exagerados dentro de una misma MDMS [12].

2.2.3 Arquitectura de comunicación totalmente distribuida

Dentro de esta arquitectura de comunicación, el costo para el uso de la información es el siguiente:

$$\sum_{j=1}^M \gamma C_j y_j$$

De esto se parte hacia la función objetivo que resultara ser:

$$\text{Min } \beta \left(\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \lambda_i d_{ij} x_{ij} + \sum_{j=1}^M \gamma C_j y_j \right) + \sum_{j=1}^M F_j y_j. \quad (5)$$

Este algoritmo resuelve el tema de la minimización del costo para la implementación de un MDMS totalmente distribuido, con la observación que $\lambda_i d_{ij}$ es evaluado con la comparación de un MDMS cuando es asignado algún concentrador.

Las restricciones que posee esta solución son las mismas que el algoritmo anterior, que son (2), (3) y (4).

2.3 Escalabilidad del sistema

Para analizar la escalabilidad del sistema es necesario generar un modelamiento matemático que permita mostrar el funcionamiento de las arquitecturas de comunicación y su respectiva simulación. Esta modelización permitirá encontrar el despliegue óptimo de un MDMS mediante un algoritmo heurístico⁵.

Este algoritmo conciso pretende brindar un método de optimización práctico en resolver problemas de implementación de la infraestructura, por lo tanto en este punto se analizará la escalabilidad de las arquitecturas de comunicación para una Smart Grid, que son:

- Arquitectura de comunicación MDMS centralizada,
- Arquitectura de comunicación MDMS distribuida,
- Arquitectura de comunicación MDMS totalmente distribuida.

Nótese que este análisis será asintótico⁶, en el cual se asume que no hay límites

⁵ Se define como el arte, técnica o procedimiento práctico o informal, para resolver problemas. Procedimientos que sugieren o establecen cómo proceder y qué problemas evitar a la hora de generar soluciones y elaborar hipótesis

⁶ Debe entenderse como cantidad o valores que pueden ser infinitos sin encontrar una condición que impida ese crecimiento.

superiores del numero de MDMS distribuidos[13].

2.3.1 Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS centralizada

Cuando se utiliza una arquitectura de comunicación MDMS centralizada solo se emplea un MDMS. Como se mencionó anteriormente, el costo de uso de información es despreciable en este caso por existir poca distancia de comunicación entre el MDMS y el concentrador o centro de operaciones.

Entonces el costo que se expuso en (1) quedaría reducido a la siguiente expresión:

$$\beta \sum_{i=1}^N \lambda_i D_i + F_0. \quad (6)$$

En la expresión mostrada D_i es la distancia entre el concentrador i y el MDMS central. La expresión F_0 representa el despliegue del costo del MDMS central. En la práctica, la distancia entre un MDMS y un concentrador o centro de operación es la longitud de la trayectoria que pasa a través de la ruta. Sin embargo, para el análisis, se supone que es la distancia directa entre los dos lugares[13].

La parte clave de este cálculo está en $\sum_{i=1}^N \lambda_i D_i$. Dado que los valores de λ_i y D_i pueden ser apreciados como variables aleatorias, el valor esperado por definición para variables aleatorias discretas se obtiene la siguiente expresión:

$$E[\lambda_i D_i] = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_i D_i}{N}. \quad (7)$$

Por otra parte se tiene también que:

$$E[\lambda_i D_i] = E[\lambda_i]E[D_i] = \bar{\lambda}\bar{D}. \quad (8)$$

Aquí se tiene que el valor de $\bar{\lambda}$ es la tasa media de tráfico de información, y que en los concentradores \bar{D} es la distancia media entre un concentrador y el MDMS central.

Teniendo una gran cantidad de N^7 , se puede derivar la siguiente expresión en función de ABDP para la arquitectura de comunicación centralizada, la misma que tendrá la connotación respectiva $ABDP_C$ ⁸, esto en base a (7) y (8):

$$ABDP_C = \sum_{i=1}^N \lambda_i D_i \approx \bar{\lambda}\bar{D}N. \quad (9)$$

Como resultado final, el costo total de una arquitectura de comunicación centralizada

⁷ Número de concentradores para la arquitectura de comunicación centralizada.

⁸ Producto Ancho de banda-distancia Acumulada para la arquitectura de comunicación centralizada.

tradicional puede expresarse de la siguiente forma:

$$TotCost \approx \beta \overline{\lambda D} N + F_0. \quad (10)$$

Lo antes expuesto significa que bajo el concepto de una arquitectura de comunicación centralizada, tanto el costo total como el valor de escala lineal ABDP es lineal con los tres elementos importantes[13], que son:

- Numero de concentradores⁹,
- Tasa promedio de generación de datos de un concentrador, y
- La distancia promedio entre un concentrador y la central del MDMS.

2.3.2 Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS distribuida

Con el empleo de la arquitectura MDMS distribuida, se tiene un número óptimo de MDMS que son reflejados como M_0 , puesto que su intención es reducir al máximo el costo total. Siendo un análisis asintótico¹⁰, se asume que al área de cobertura de una Smart Grid dentro del sistema AMI, corresponde a la división de las subregiones con igual tamaño para M_0 , el cálculo del número de concentradores para cada subregión será $\frac{N}{M_0}$, y el tamaño de cada subregión será $\frac{A}{M_0}$ [13].

En cada subregión j que tiene $\frac{N}{M_0}$ concentradores, el valor de ABDP para la recolección de información puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\sum_{k=1}^{\frac{N}{M_0}} \lambda_k d_{kj}. \quad (11)$$

Debe notarse que \overline{d}_j es la distancia promedio entre el concentrador en la subregión j y el MDMS j , además se asume que la tasa promedio de tráfico en cada subregión sea la misma que en toda la zona. Muy semejante a la derivación que se tenía para la arquitectura de comunicación centralizada, el valor de ABDP de una subregión j se puede aproximar como:

$$\sum_{k=1}^{\frac{N}{M_0}} \lambda_k d_{kj} \approx E[\lambda_k d_{kj}] \frac{N}{M_0} = \overline{\lambda d}_j \frac{N}{M_0}. \quad (12)$$

La relación de distancia promedio entre un concentrador en la subregión j y su

⁹ A este valor tambien se les deben contar o incluir el número de Smart Meters.

¹⁰ El análisis asintótico es un método de descripción de la limitación de comportamiento. Limitar el comportamiento se expresa en el lenguaje de las relaciones de equivalencia

correspondiente MDMS más la longitud de un lado de la subregión j debe ser la misma para toda el área[13]. Tomando en cuenta que la subregión se expresa en términos de $\frac{A}{M_0}$, la longitud de cada lado (se debe asumir que es una área cuadrada) será $\sqrt{\frac{A}{M_0}} = \frac{a}{\sqrt{M_0}}$

[13]. Por lo tanto se tendrá:

$$\bar{d}_j = \frac{\bar{D}}{a} \frac{a}{\sqrt{M_0}} = \frac{\bar{D}}{\sqrt{M_0}}. \quad (13)$$

Substituyendo (13) en (12), quedaría así:

$$\sum_{k=1}^{\frac{N}{M_0}} \lambda_k d_{kj} \approx \frac{\bar{\lambda} \bar{D} N}{M_0^{\frac{3}{2}}}. \quad (14)$$

De forma similar, el valor ABDP para el costo de uso de información expuesto en (1) puede ser estimado como:

$$\alpha \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} C_j \approx \alpha \frac{N}{M_0} \bar{\lambda} \sum_{j=1}^{M_0} C_j. \quad (15)$$

Si se define como \bar{C} la distancia promedio entre un MDMS distribuido y el centro de operación, podría aproximarse el valor de \bar{D} , que es la distancia promedio entre un concentrador y el centro de operaciones, a continuación la anterior expresión podría convertirse en la siguiente:

$$\alpha \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} C_j \approx \alpha \bar{\lambda} \bar{D} N. \quad (16)$$

Ahora si se sustituye (14) y (16) en (1), se tendría lo siguiente:

$$TotCost = \sum_{j=1}^{M_0} \frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{M_0^{\frac{1}{2}}} + \alpha \beta \bar{\lambda} \bar{D} N + \sum_{j=1}^{M_0} F_j \approx \frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{M_0^{\frac{1}{2}}} + \alpha \beta \bar{\lambda} \bar{D} N + M_0 \bar{F}. \quad (17)$$

Nótese que \bar{F} es el despliegue del costo promedio de un MDMS distribuido. Para garantizar que el valor de (17) está minimizado, M_0 puede expresarse así:

$$M_0 = \left(\frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{\bar{F}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (18)$$

Como resultado, el costo total óptimo puede ser aproximado por:

$$TotCost = 2(\beta \bar{\lambda} \bar{D} N)^{\frac{2}{3}} \bar{F}^{\frac{1}{3}} + \alpha \beta \bar{\lambda} \bar{D} N. \quad (19)$$

Si se considera el valor ABDP para la arquitectura de comunicación distribuida,

denotada como $ABDP_D$, se puede aproximar así:

$$ABDP_D = \sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^N \lambda_i d_{ij} x_{ij} + \alpha \sum_{i=1}^N \lambda_i x_{ij} C_j \right) \approx \frac{\bar{\lambda} \bar{D} N}{M_o^{\frac{1}{2}}} + \alpha \bar{\lambda} \bar{D} N = (\bar{\lambda} \bar{D} N)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\bar{F}}{\beta} \right)^{\frac{1}{3}} + \alpha \bar{\lambda} \bar{D} N. \quad (20)$$

En esta expresión se puede observar tanto el valor ABDP como el valor del costo total para la recolección de información dentro de una arquitectura MDMS distribuida a escala de $x^{\frac{2}{3}}$ en términos de:

- Número de concentradores N ,
- La tasa de tráfico promedio en cada concentrador $\bar{\lambda}$, y
- La distancia promedio entre el concentrador y la central MDMS.

Que resulta ser proporcional a la longitud de un solo lado de la zona[13].

En contraste, el costo de la información de uso, que está expuesta en la segunda parte en (19) y (20), a escala de forma lineal en términos de los tres parámetros anteriores:

- Número de concentradores N ,
- La tasa de tráfico promedio en cada concentrador $\bar{\lambda}$, y
- La distancia promedio entre el concentrador y la central MDMS.

Cuando α es pequeña, la arquitectura de comunicación MDMS distribuida puede ser mucho más escalable comparada con una arquitectura MDMS centralizada. De hecho cuando $N \rightarrow \infty$, el primer término en (19) y (20) puede ser despreciado en comparación con el segundo término. Esto significa que tanto el costo total como el valor ABDP de la arquitectura distribuida es α veces mas escalable que la arquitectura centralizada[13].

2.3.3 Escalabilidad de una Arquitectura de comunicación MDMS totalmente distribuida

De forma muy similar a la arquitectura MDMS distribuida, este nuevo análisis se basa en el mismo modelo de M_o para un óptimo diseño del centro de operaciones distribuido. El costo total calculado puede ser estimado de la siguiente forma:

$$TotCost = \sum_{j=1}^{M_o} \left(\frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{M_o^{\frac{3}{2}}} + \gamma \beta C_j \right) + \sum_{j=1}^{M_o} F_j \approx \frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{M_o^{\frac{1}{2}}} + \gamma \beta M_o \bar{D} + M_o \bar{F}. \quad (21)$$

Para minimizar el costo total, podría M_o tomar los siguientes valores:

$$M_0 = \left(\frac{\beta \bar{\lambda} \bar{D} N}{\gamma \beta \bar{D} + \bar{F}} \right)^{\frac{2}{3}}. \quad (22)$$

Como resultado, el valor del costo total óptimo también podría aproximarse de la siguiente manera:

$$TotCost = 2(\beta \bar{\lambda} \bar{D} N)^{\frac{2}{3}}(\gamma \beta \bar{D} + \bar{F})^{\frac{1}{3}}. \quad (23)$$

De manera correspondiente, el valor ABDP para la arquitectura totalmente distribuida se puede expresar así:

$$ABDP_F \approx (\bar{\lambda} \bar{D} N)^{\frac{2}{3}} \left(\gamma \bar{D} \left(\frac{\beta}{\gamma \beta \bar{D} + \bar{F}} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{\gamma \beta \bar{D} + \bar{F}}{\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \right). \quad (24)$$

Se puede observar que el costo total y el valor ABDP para la arquitectura totalmente distribuida puede ser a la escala de $x^{\frac{2}{3}}$, en términos del número de concentradores N , y la tasa media de tráfico en cada concentrador $\bar{\lambda}$. Esto lógicamente significa que la arquitectura totalmente distribuida es más escalable que la arquitectura MDMS distribuida y esta a su vez más escalable que la arquitectura centralizada[13].

2.4 Evaluación del rendimiento de un MDMS

Para un análisis a modo de simulación se asumirá una situación en la que existen 2500 concentradores, y están distribuidos uniformemente en un área de 100 x 100 km, dejando disponibles 100 plazas de posibles lugares para poder ubicar la central MDMS en la misma zona, el centro de operaciones será ubicado en el centro de la localidad.

Esta simulación tiene una cantidad de 1 millón de habitantes, asumiendo que cada familia o grupo familiar posee 4 integrantes, y tienen un Smart Meter por familia. El número de Smart Meters cubiertos por cada concentrador es de 100 como promedio.

Actualmente, un Smart Meter consume al año 400 Mega Bytes para enviar su información a su respectivo concentrador, considerando que son enviados cada 15 minutos, cada envío de información necesita 12 Kb de datos[13].

Pensando en futuras aplicaciones es necesario considerar una frecuencia de muestreo más grande para evitar apagones en cascada. Por lo que se sigue un muestreo de cada 10 segundos, correspondiéndole una velocidad de datos de 10 Kbps, por cada Smart Meter. Como resultado de este breve análisis la tasa de datos promedio en un

concentrador será de 1 Mbps.

2.4.1 Resultados de rendimiento de las arquitecturas

Anteriormente se analizó la escalabilidad de las tres arquitecturas planteadas, en este momento se verificarían la exactitud de esas estimaciones.

Se llevarán a cabo simulaciones con varios valores para N , que van de 1000 a 10000. El costo de implementación de cada MDMS se asume que es de 100000 y $\alpha = 0,1$.

El costo unitario para el ABDP se asume como $\beta = 100\$$ (por Mbps x Km). El ancho de banda necesario entre cada centro de operaciones distribuida y la central es $\gamma = 100Mbps$. Nótese que la distancia promedio entre un concentrador y la central MDMS es estimada como $\bar{D} \approx 0.4a$ ya que la zona que estimamos es un cuadrado, lo que representa que $\frac{2r}{3}$ si el área es un círculo de radio r .

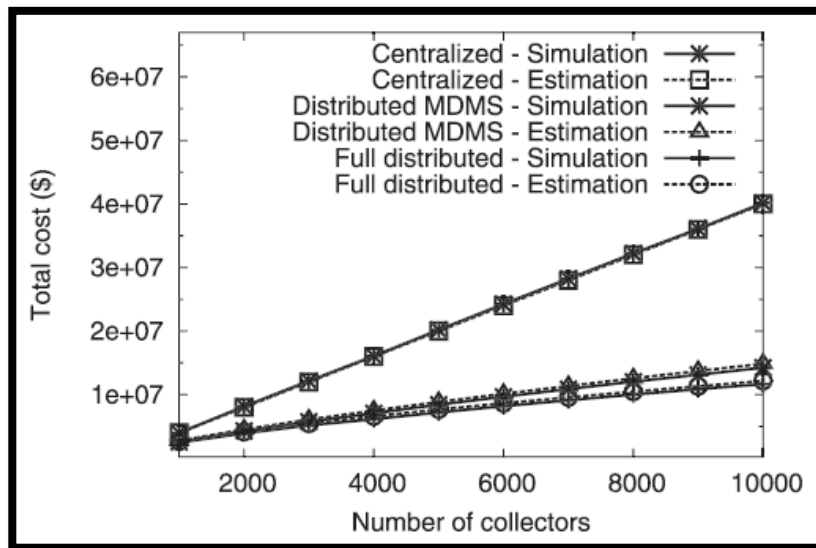


Figura 9: Comparación de la simulación vs estimación teórica para el resultado del Costo Total.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid*.

El costo total expresado en (10), (19) y (23) se compara con los resultados de la simulación mediante la ecuación del algoritmo 1 y del algoritmo de la arquitectura totalmente distribuida. Se puede observar en la anterior figura que las estimaciones teóricas coinciden con los resultados de simulación para una amplia gama de valores de N , lo cual confirma el análisis asintótico que se planteó al inicio.

Por otro lado, la comparación del valor ABDP que se presenta en la figura siguiente

también muestra que las estimaciones teóricas coinciden con los resultados de simulación para la misma gama de valores.

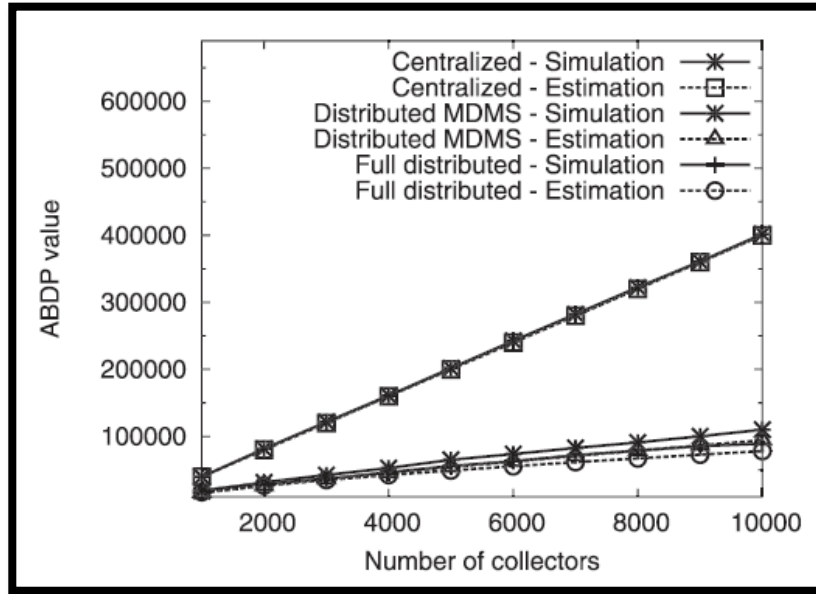


Figura 10: Comparación de la simulación vs estimación teórica para el valor ABDP.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid*.

Ahora se presenta en la Figura 11, la simulación del efecto de la tasa de tráfico $\bar{\lambda}$ en un concentrador. En este caso $\bar{\lambda}$ varía de 1 a 10 Mbps, lo que significa el intervalo de muestreo se reduce de 10 segundos a 1 segundo. Se puede observar que en la arquitectura de comunicación centralizada, el costo total del sistema tiene una escala de forma lineal en términos de $\bar{\lambda}$. En contraste, el costo total en la arquitectura de comunicación MDMS distribuida, en la cual su escala es mucho más lenta, la diferencia entre el costo total y el de la arquitectura centralizada se vuelve más y más grande según crece el valor de $\bar{\lambda}$. Sin embargo, este beneficio es menos evidente cuando α llega a ser grande, lo que significa que el costo de uso de la información jugará un papel significativo en el costo total.

Cuando $\alpha = 1$, se convierte en la misma que la arquitectura centralizada, ya que solo un MDMS podrá ser seleccionado.

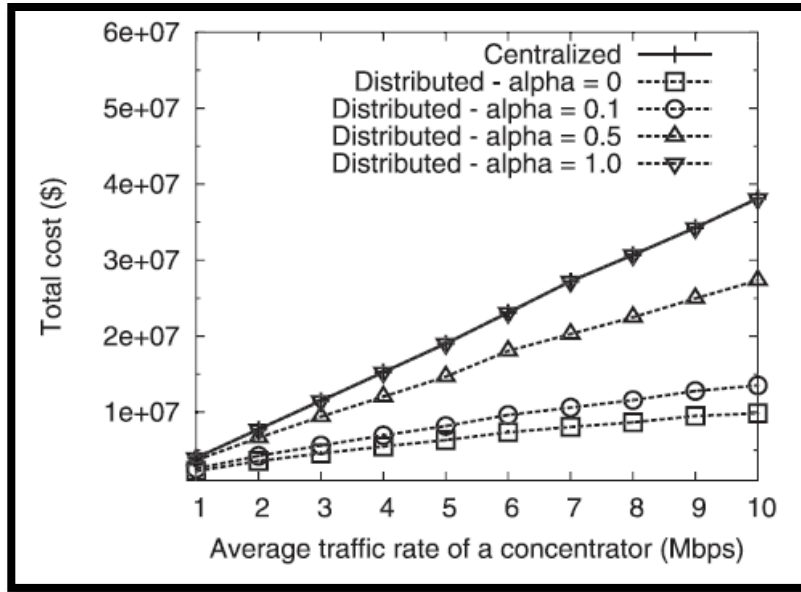


Figura 11: Cambio del costo total mínimo en términos de la tasa promedio de tráfico en cada concentrador.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid.

En la otra simulación experimental, se estudia el efecto del costo de cada MDMS para su implementación, como se muestra Figura 12, un costo de implementación superior en los MDMS implica que exista un mayor costo total, también pueden ser visibles estos resultados en los análisis que se hace en (19).

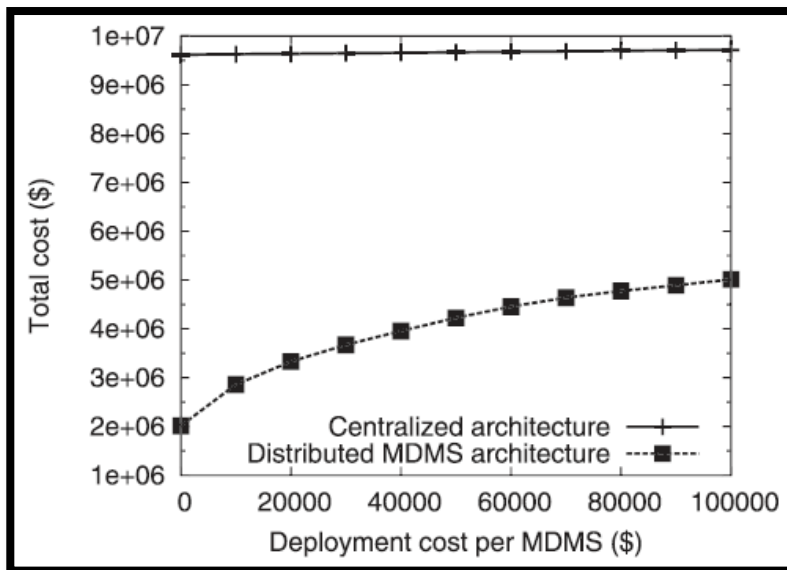


Figura 12: Costo mínimo total en términos del despliegue del costo de una MDMS.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid.

Por su parte, cuando el costo del despliegue de una MDMS aumenta, el proceso del algoritmo diseñado anteriormente, hace que sean seleccionados menor cantidad de MDMS para frenar el incremento del costo total, convirtiéndolo en un algoritmo de optimización real. Esto es confirmado por los resultados de la Figura 13, basado en el análisis de (18) que se muestra que $M_o \propto \frac{1}{F^{\frac{2}{3}}}$, donde M_o representa el numero optimo de los MDMS[13].

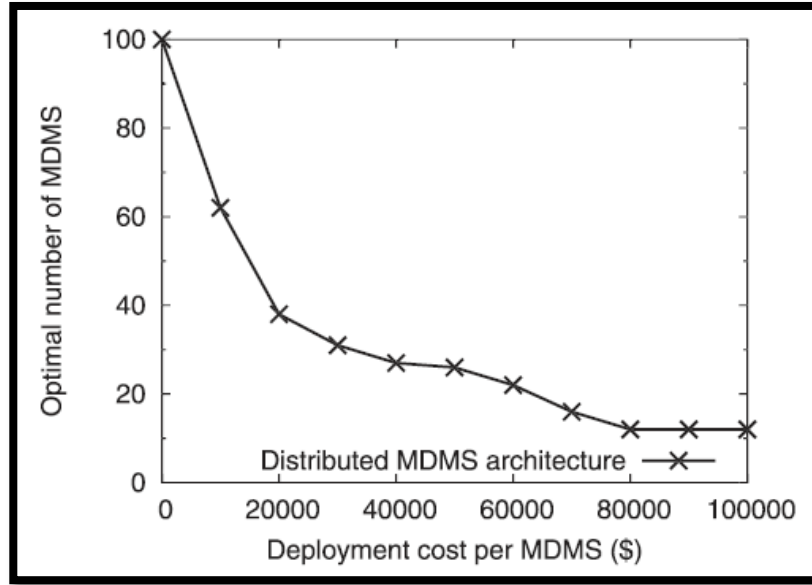


Figura 13: Número óptimo de MDMS vs despliegue del costo.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid.*

Si el valor de M , el número de lugares candidatos para implementar el MDMS, es pequeño comparado con el valor optimo teórico de M_o , el costo mínimo total y el valor de ABDP obtenido en el algoritmo 1 serán mayores que los resultados óptimos teóricos que no se asumen ninguna restricción sobre la selección de los lugares para MDMS.

Como se muestra en la Figura 14, cuando el valor de M es pequeño el valor ABDP de una arquitectura de comunicación distribuida es cercana a una arquitectura de comunicación centralizada. El valor mínimo de ABPD se obtiene cuando hay cuatro candidatos o más para la selección de ubicación de un MDMS.

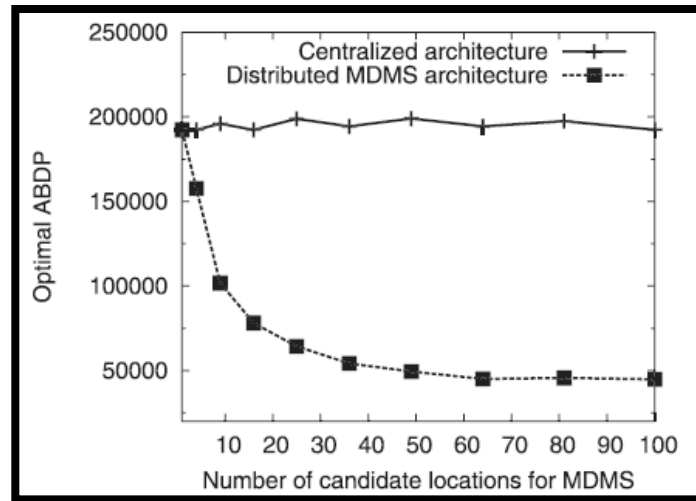


Figura 14: Número de candidatos para la localización de un MDMS.

Fuente: Hu, R. Q., Zhou, J., & Member, S. (2012). *Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid*.

Como una reseña breve de lo que tratamos en este capítulo tenemos que la colocación de un MDMS en una arquitectura distribuida se formula como un problema de optimización para reducir al mínimo el costo, que lógicamente es proporcional al valor ABDP, que como ya se mencionó es una medición de los recursos de comunicación utilizado para la migración de datos en un sistema para soportar las aplicaciones de red inteligente.

Se proponen algoritmos ambiciosos para resolver los problemas de optimización. Los resultados de la simulación demuestran que el algoritmo propuesto puede lograr beneficios significativos en las arquitecturas de comunicación distribuidos en comparación con el uno centralizado tradicional[13].

Además de la idea de escalabilidad que es muy factible puesto que los beneficios que se expusieron y los análisis así lo demuestran.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DE ARQUITECTURAS DE COMUNICACIÓN

A continuación se analizará el costo de las arquitecturas de comunicación Centralizada, Distribuida y Totalmente Distribuida frente a las variaciones de distancia, ancho de banda por kilómetro y velocidad de comunicación. Las gráficas parciales y globales pondrán en evidencia qué arquitectura es la adecuada según las necesidades, capacidad de la Smart Grid, tamaño de la base de datos y el presupuesto.

Además, se presentan las normas que se sugieren para la transmisión de datos; así como también se ejemplifica la forma de comprimir la información medida por los Smart Meters y enviarla hasta el centro de operaciones para su descompresión y análisis. Finalmente la gestión de la información y cantidad de datos que serán representativos para su medición y almacenamiento.

3.1 Tasas de envío y recepción de datos del Smart Meter

Se debe recordar que un Smart Meter es un dispositivo que funciona dentro de una red inteligente, por lo tanto está sujeto a variaciones de acuerdo a factores como los tipos de sistemas de distribución eléctrica, y estas a su vez varían según las características geográficas, climáticas, propiedad y parámetros de negocio. Por lo tanto hay dos componentes bien definidos en la red de trabajo de un Smart Meter[15].

El primer componente es la red de trabajo para un Smart Meter, y las características son las siguientes:

- Intercambio de información de dos vías, mediante la infraestructura de comunicaciones integrada que permite en tiempo real llevar los datos del dispositivo.
- Dispositivos de medición inteligentes que incluyen en la red AMI, para el registro y comunicación de información detallada sobre la calidad y uso de la energía eléctrica.
- Sensores y sistemas de monitoreo en toda la red para mantener un control sobre el flujo de energía y rendimiento de los elementos activos de la red eléctrica.
- Controles para detección y reparación de fallas proporcionando a la red eléctrica una solución de auto- recuperación.
- Sistemas con aplicaciones integradas y de análisis de datos.

El segundo componente son las características de la red de trabajo para un Smart Meter, y las características son las siguientes:

- Participación activa que ofrece la red a los consumidores o usuarios, dándoles la posibilidad de controlar mejor su consumo de energía eléctrica.
- Respuesta automática de reconexión frente a fallas en la distribución. Resistencia a los ataques de seguridad cibernética para cumplir con los protocolos de seguridad que impone la red inteligente.
- Activar las opciones de generación y almacenamiento de información en las redes de participación establecidos en otros niveles de la red, como son clientes residenciales e industriales.
- Optimizar el rendimiento de los equipos activos de la red para mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos de operación mantenimiento mediante el aprovechamiento de la información proporcionada por la capacidad de monitoreo automático.
- Permitir a las redes de distribución ser más resistentes a los desastres naturales con la capacidad de auto-recuperación rápida, caso que solo sucede en las redes de transmisión.

3.1.1 Sistema de comunicación

Para la comunicación interna entre los dispositivos de la residencia, se utiliza la red Home Area Network, Red de Área Local (HAN), la cual establece un enlace de comunicación entre el Smart Meter y los electrodomésticos inteligentes, otros Smart Meter¹¹, pantalla en el hogar, y la unidad de micro generación entre otros equipos que pueden ser conectados. La red HAN proporciona una gestión centralizada de la energía, en los servicios y en las instalaciones. El protocolo de comunicación puede ser un medio de comunicación por cable o inalámbricos[3].

Dentro de las redes inalámbricas están Zig-bee, Z-Wave, Wi-Fi, y Power Line Communication (PLC) se utilizan ampliamente en protocolos HAN. La comunicación Zig-Bee ha sido reconocida como una red efectiva, por tener menos complejidad, consumo de baja potencia, y los medios de comunicación fiables para manejar una red HAN.

¹¹ Medidores inteligentes tales como: Agua, Gas, Presión, Humedad, etc.

Además de lo mencionado, los Smart Meter por tener la comunicación Zig-bee pueden intercomunicarse entre sí con los medidores inteligentes vecinos, esto sirve a modo de antena repetidora de señal o información. Para lo cual utilizan una red Neighborhood Area Network, Red de Área de Barrio (NAN) facilitando los mensajes de diagnóstico, actualizaciones de firmware, y mensajes en tiempo real. Este protocolo de comunicación Zig-bee es ampliamente utilizado en NAN debido a la alta velocidad de transferencia de datos y su bajo costo.

Ahora para la transmisión de información desde el Smart Meter hacia el concentrador o el servidor remoto se comunica mediante la red Wide Area Network, Red de Área Amplia (WAN) la cual transfiere los datos directamente al servidor a través de los medios de comunicación inalámbrica estableciendo un enlace entre el Smart Meter y el centro de operaciones a través de un concentrador de datos para la facturación, la indicación de los cortes de energía y la habilitación de la oferta de energía, detecciones de sabotaje y configuraciones remotas. Las tecnologías de la comunicación que pueden ser utilizadas para la comunicación entre el Smart Meter y la red WAN pueden ser:

- Global System for Mobile Communications, Sistema Global para Comunicaciones Móviles (GSM), desde los años 90, ha ido mejorando su funcionalidad a través de muchas evoluciones con el único objetivo de hacer que la tecnología resulte ser fiable, eficiente y mejor [16],
- General Packet Radio Services, Servicio General de paquete vía radio (GPRS), que su función en gran medida es mejorar y simplificar el acceso inalámbrico a la red de paquetes de datos. Se aplica un principio de radiocomunicaciones para transferir paquetes de datos de usuario de una manera eficiente entre estaciones móviles [17],
- Tercera generación (3G) basada en la transmisión de voz y datos a través de telefonía móvil mediante servicio universal de telecomunicaciones móviles [18],
- Worldwide Interoperability for Microwave Access, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMax), resulta ser una norma de transmisión de datos que utiliza las ondas de radio en las frecuencias de 2,3 a 3,5 GHz y puede tener una cobertura de hasta 50 km. Una de sus ventajas es dar servicios de banda ancha en zonas donde la instalación de cable o fibra óptica presenta unos costos por usuario muy elevados (zonas rurales). [19].

Después de lo brevemente expuesto, la experiencia muestra que por el momento GSM ofrece una cobertura más amplia que otros medios. Sin embargo, es una comunicación costosa a largo plazo.

3.1.2 Normativas de comunicación

Existen muchas normas para medir la precisión de la metodología de los Smart Meters, sin embargo las normas de uso mundial son International Electrotechnical Commission, Comisión Electrotécnica Internacional, (IEC) [20]; y American National Standards Institute, Instituto Nacional Estadounidense de Estándares, (ANSI) [21].

“Fundada en 1906, la IEC es la organización líder a nivel mundial encargada de preparar y publicar Normas Internacionales para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y afines. Estas actividades se conocen en su conjunto como electro tecnología.”¹²

Para la segunda normativa, la meta *“consiste en ampliar la inclusión de planes de estudio en las escuelas de las normas de ingeniería y de negocios a través de asociaciones con organizaciones como el ANSI”¹³*

En tal virtud, los componentes y funciones de los Smart Meters deben cumplir certificados internacionales basados en las normas mencionadas. Según la demanda y crecimiento de la producción e innovación de los Smart Meters, muchos gobiernos, organizaciones o industrias siguen evolucionando y con ello se implementan directrices y normas para mejorar la seguridad, funcionamiento y precisión de los mismos[22].

Atendiendo a estas normas de construcción y comunicación, la fabricación de un Smart Meter posee las siguientes características en cuanto a la transmisión de información:

- Cada 15 minutos, el Smart Meter se prepara para enviar información de fase hacia el servidor principal.
- Como se visualiza en la Figura 15, la primera fila muestra el tipo de datos, mientras que la segunda fila muestra el número de caracteres para los datos

12 Making, C. (2011). Bienvenidos a la IEC. In COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL (Vol. 131, p. 131).

13 Purcell, D. E. (2008). The Strategic Value of Standards Education Table of Contents. The Strategic Value of Standards Education, (August), 40–48.

específicos.

- Estos datos incluyen identificación del Smart Meter, valores de Voltajes RMS instantáneos y Corriente en cada fase, potencia activa, reactiva y aparente en cada fase, energía activa total consumida, energía exportada, la energía reactiva total, la frecuencia y el tiempo.
- Al final de cada día otro conjunto de datos se envía de vuelta al servidor. Mediciones de calidad de potencia de cada día se envían con la identificación del Smart Meter. Número de caídas de líneas detectadas en cada fase, el número de pico de Tensión y picos de Corriente.

Para mostrar la información al usuario o administradores de energía el formato de SMS se muestra en la Figura 16.

Meter Id	Phase A RMS voltage	Phase B RMS voltage	Phase C RMS voltage	Phase A RMS current	Phase B RMS current	Phase C RMS current
4	5	5	5	5	5	5
Phase A Active power	Phase B Active power	Phase C Active power	Phase A Reactive power	Phase B Reactive power	Phase C Reactive power	Phase A Apparent power
8	8	8	8	8	8	8
Phase B Apparent power	Phase C Apparent power	Active energy consumed	Active energy exported	Reactive energy	Frequency	Time and date
8	8	8	8	8	4	12

Figura 15: Formato de transmisión de datos (Medición de energía parcial y total)

Fuente: Barker, S., Member, S., Kalra, S., & Irwin, D. (2014). and Analysis of Smart Meter Data, 32(7), 1312–1327.

Meter Id	Data Id	Phase A Line Sag detection	Phase B Line Sag detection	Phase C Line Sag detection	Peak voltage detection	Peak current detection	Time and date
4	2	4	4	4	4	4	14

Figura 16: Formato de transmisión de datos (Medición de calidad de energía)

Fuente: Barker, S., Member, S., Kalra, S., & Irwin, D. (2014). and Analysis of Smart Meter Data, 32(7), 1312–1327.

Según lo expuesto, se puede notar claramente que el Smart Meter posee tres componentes muy bien definidos y elementales para su funcionamiento[23]:

- Sistema de medición de energía y valores asociados,
- Espacio y capacidad de memoria, y
- Dispositivo de comunicación.

Pero dentro de estas funciones fijas, existen variables según la necesidad o aplicación requerida para un Smart Meter:

- Sistemas de alimentación.
- Procesador de cálculo.
- Procesador de comunicaciones.
- Dispositivo de accionamiento o control.

Mediante esta información, las siguientes normas se pueden considerar como el consenso sobre los fundamentos de la tecnología de información para la futura transición de la red de distribución eléctrica hacia una red inteligente[24]. Las normativas o estándares que regulan la comunicación dentro de una Smart Grid corresponden a:

- IEC 62056 Medición de electricidad – intercambio de datos para lectura de medidas, tarifas y control de carga.
- IEC 62058 Equipo de medición de electricidad.
- IEC 62325 Marco para las comunicaciones del mercado energético.
- IEC 61970/61968: Common Information Model, Modelo de Información Común (CIM)
- IEC 61850: Substation Automation Systems, Sistemas de Automatización de Sistemas (SAS) [25]
- IEC 62351: Security for the Smart Grid, Seguridad para una Red Inteligente.
- IEC 62357: TC 57 Seamless Integration Architecture,
- IEC 60870: Communication and Transport Protocols, Protocolos de Transporte y Comunicación.
- IEC 61400-25: Communication and Monitoring for Wind Power Plants, Comunicación y Monitoreo de Plantas de Energía Eólica.
- ANSI C12.19/MC1219: Modelo de información de la medición de ingresos[24].
- NIST Special Publication (SP) 800-53, NIST SP 800-82, Normas de seguridad cibernética y directrices para sistemas de información federal, incluyendo aquellas de sistema de potencia[24].

3.1.3 Definición de datos relevantes.

Se consideran datos relevantes a aquellos que son enviados por el Smart Meter y tendrán prioridad según su uso o aplicación¹⁴, lo cual es determinado por las simulaciones que serán realizadas. Por lo tanto desplegamos a continuación la lista de datos enviados por el dispositivo de medición inteligente.

SIMBOLOGÍA	DESCRIPCIÓN	UNIDAD DE MEDIDA	IMPORTANCIA
V	Voltaje	Voltios (V)	A
I	Corriente	Amperios (A)	A
F	Frecuencia	Hertzios (Hz)	A
Fp	Factor de Potencia	Adimencional	C
P	Potencia Real	Watts (W)	A
Q	Potencia Reactiva	Voltamperios Reactivos (VAR)	B
S	Potencia Aparente	Voltamperios (VA)	B
A	Distorsión total de Armónicos	Adimencional (THD)	E
#	Dirección del Equipo	IP	B
T	Hora y Fecha	(hh:mm:ss) (dd-mm-aa)	A

TABLA 3.1 Datos medibles mediante el Smart Meter.

Los parámetros de importancia son asumidos según su frecuencia de uso de esa información:

- A.- Cada 15 minutos.
- B.- Cada 4 horas.
- C.- Una vez al día.
- D.- Una vez a la semana.
- E.- Una vez al mes.

¹⁴ Dependerá también del prototipo general de construcción y diseño, entre las marcas podría variar ciertos datos a ser enviados.

3.1.3.1 Voltaje en un Smart Meter

Una de las bondades que presentan los Smart Meter es poder medir la calidad de energía respecto a las variaciones que pueda tener tanto de elevación como caída de su valor nominal. Con técnicas de análisis de datos que posee el propio equipo, se analiza la relación de eventos de tensión con respecto a la temperatura ambiente, momentos del día, días de la semana, la duración, magnitud y el estado de la generación integrada. Esta información de análisis se convierte en el punto de referencia para mejorar la calidad de energía entregada al usuario[26].

Lógicamente, los límites de referencia para esta variación son delimitados por las empresas distribuidoras de energía eléctrica ajustadas a las normativas de cada país, y por un periodo de segundos o minutos prudenciales para que resulte ser un dato informativo real.

Los eventos informativos consisten en:

- Identificación del Smart Meter (dirección)
- Fecha y hora del suceso (de inicio y finalización)
- Voltajes medio, máximo y mínimo. Ente otros.

Pueden ser descargados estos datos informativos en paquetes de software como Microsoft Excel, Microsoft Access o MatLab [26].

Se considera al Voltaje como un Big Data, por tener características que pueden estar indicados por tres indicadores importantes: Volumen, Velocidad y Variación. Los términos de Volumen y Velocidad están sobreentendidos, sin embargo la variación se refiere al número de bases de datos que contienen datos que debe ser procesada para mejorar la visión y la toma de decisiones. Para permitir acciones correctivas que deben tomarse, los datos de calidad de voltaje deben ser analizados en conjunto con los datos de conectividad de red, generación y distribución de la energía eléctrica[26].

Además de lo mencionado, la estructura del Smart Meter trifásico tiene la capacidad de medir el desequilibrio de tensión entre fases, mediante el uso de una sola solución de chip. El medidor inteligente trifásico es aplicable al sistema de cuatro cables trifásico. Se puede dividir en cuatro secciones, una sección de alimentación, una sección de unidad de micro-controladores, una sección de detección, y una sección de comunicación. La sección de suministro de energía es la fuente de alimentación de conmutación de tres fases con la protección contra sobretensiones [27].

Esto lo puede mostrar la figura siguiente, que posee un despliegue rápido de su

constitución interna del Smart Meter trifásico:

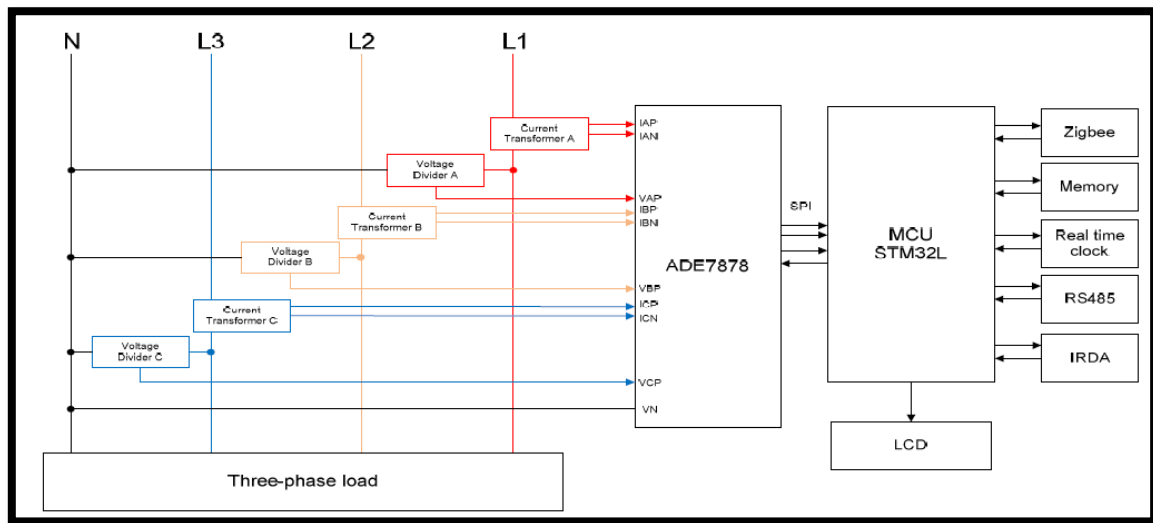


Figura 17: Estructura de un Smart Meter con medición de desbalance de fases.

Fuente: Tangsunantham, N., & Pirak, C. (2013). Voltage unbalance measurement in three-phase smart meter applied to AMI systems. 2013 10th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 1–5. doi:10.1109/ECTICon.2013.6559601.

También tiene la capacidad de medir el tiempo de retardo entre tensiones de fase, entre las corrientes de fase, y entre tensiones y corrientes de la misma fase, esto lo logra con el procesador del reloj que posee el Smart Meter, el retraso entre tensiones de fase se utiliza para calcular el ángulo entre tensión de fase [27].

3.1.3.2 Corriente en un Smart Meter

En la estructura interna del Smart Meter posee una característica que permite hacer mediciones de una corriente de recirculación, esto se conoce como el principio de circulación de corriente cero por un transformador, el cual advierte de corrientes de recirculación a través del Smart Meter o algunos dispositivos activos. Con este criterio las empresas eléctricas que suministran el servicio buscan que estos valores de corriente sean cero o aproximados a cero, por lo cual tienen un valor de tolerancia del 1%. Como se conoce, la característica de este Smart Meter puede activar un contactor que abra o cierre el paso de corriente hacia las cargas internas [28].

Con el transformador de corriente de la línea cero, el Smart Meter puede ser considerado como un juez para determinar si el usuario ha violentado la obtención de la energía de manera auxiliar, pero la premisa del cableado del medidor inteligente es

completamente correcta. Para asegurar el conocimiento y la comprensión de las características completas del Smart Meter en estricta conformidad con los estándares de cableado y precisión se sugiere esta conexión:

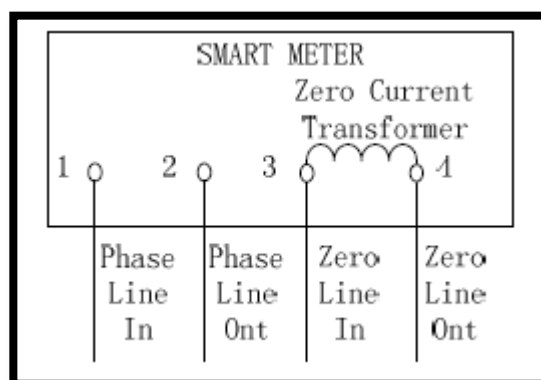


Figura 18: Ejemplo de conexión de un transformador de corriente de línea Cero.

Fuente: Feng, S., Zhu, L., & Liu, Z. (2012). *The Zero Line Current Transformer in Smart Meter*. 2012 International Conference on Computer Science and Electronics Engineering, 269–272.
doi:10.1109/ICCSEE.2012.443

3.1.3.3 Frecuencia en un Smart Meter

La construcción electrónica de un Smart meter permite hacer una detección de cruce por cero de la señal; de voltaje que es entregada a la residencia, por lo tanto tendrá una activación de impulsos cada vez que la onda sinusoidal cruce esta barrera de los 0.6V. Como consecuencia el voltaje de la línea en 60 Hz, se verá interrumpida por un valor cero dos veces por periodo, lo cual puede ser analizado y parametrizado para poder sacar un valor de frecuencia real y ser mostrada en el Smart meter o en dispositivos inteligentes portátiles.

Como valor estándar de este tipo de dispositivos tenemos un error aceptable de 1mHz, así como para el voltaje las fluctuaciones deben ser visibles dentro de un intervalo de tiempo razonable determinado por el órgano regulador de cada país [29].

3.1.3.4 Factor de Potencia en un Smart Meter

El funcionamiento de un Smart Meter consiste en monitorear la calidad de la energía, manteniendo el factor de potencia cercano a la unidad. Además, proporciona una solución de bajo costo en la prestación del registro en tiempo real del uso de la electricidad y ayuda a los usuarios finales en mantener una ficha de consumo de

energía.

Como es conocido las cargas inductivas hacen que el factor de potencia este en retardo y así socava la calidad de energía. La calidad de la energía se mejora mediante la corrección del factor de potencia cercano a la unidad. El factor de potencia se mantiene cerca de la unidad mediante el encendido de las baterías de condensadores. Por lo tanto en algunas circunstancias que se desearía corregir el factor del potencia, el Smart meter podrá discriminar su ejecución y cerrar los circuitos correspondientes para hacer el enlace con el banco de condensadores para el usuario [30]

La siguiente grafica muestra como es el razonamiento de un Smart Meter para decidir si hace una compensación del factor de potencia o no. Esto puede ser monitoreado también por las arquitecturas de gestión de datos.

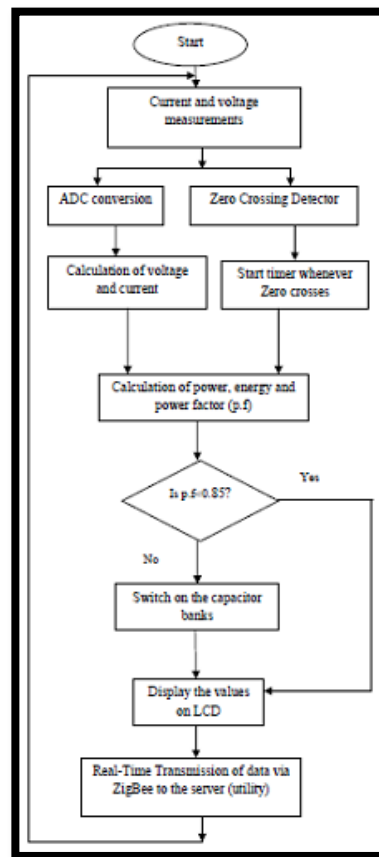


Figura 19: Diagrama de flujo de un Sistema de Medición Inteligente.

Fuente: Shree, M. A., & Vadana, D. P. (2014). Smart meter for power factor enhancement in real-time. 2014 International Conference on Embedded Systems (ICES), (Ices), 177–181.

doi:10.1109/EmbeddedSys.2014.6953112

3.1.4 Tráfico de datos en una Smart Grid

En el sistema AMI, como en cualquier tipo de arquitectura de comunicación existen perdidas o retardos de información en el envío de la misma, como se mencionó anteriormente la latencia de la información es afectada por varios factores como son medioambientales, red de comunicación, señal de cobertura, cantidad de tiempo o de uso de la red, peso de los datos enviados o recibidos, etc. Dentro del universo de los Smart Meters, existe un rango de generación de datos, que va de los 2 hasta los 10 segundos, tiempo en el cual se tardan los equipos en enviar los datos medidos [31].

El valor de latencia es la intensidad de tráfico de datos que viene medida en Erlang y responde a la siguiente fórmula:

$$A = \frac{\mu * Q}{3600}$$

Donde A es el valor de latencia en Erlangs, μ corresponde a la cantidad de conexiones requeridas en la red, y finalmente Q es el tiempo de duración de las conexiones del Smart Meter.

Por lo tanto, es posible crear relaciones según la aplicación, que permitan mostrar el comportamiento de una red de comunicación con los valores referenciales de latencia, que se debe considerar para el diseño de una Smart Grid, ancho de banda y tecnologías de comunicación a ser empleadas en cualquier arquitectura de comunicación que se desee implementar o a la que se piense escalar [31].

A continuación se presenta la tabla 2, en la que se considera el número de lecturas frente al tiempo de conexión a la red, que como se mencionó va desde 2 hasta 10 segundos:

		DURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
NÚMERO DE LECTURAS	1	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003
	2	0.001	0.002	0.002	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006
	24	0.013	0.020	0.027	0.033	0.040	0.047	0.053	0.060	0.067
	48	0.027	0.040	0.053	0.067	0.080	0.093	0.107	0.120	0.133
	96	0.053	0.080	0.107	0.133	0.160	0.187	0.213	0.240	0.267

TABLA 3.2 Evaluación del número de lecturas en el día frente al tiempo de latencia.

Como se puede notar, se tienen hasta 96 lecturas en un día, esto corresponde a intervalos de 15 minutos, sin embargo existe la opción de una sola medida al día, esto puede referenciar la cantidad de información que se deba filtrar cuando se procede a enviar datos desde el concentrador hacia los MDMS.

A su vez, la siguiente Tabla 3.3 muestra una relación de la cantidad de Smart Meter comparada con el número de lecturas o conexiones a la red:

		NÚMERO DE MEDIDAS AL DÍA				
		1	2	24	48	96
NÚMERO DE SMART METERS	1	0.002	0.0033	0.04	0.08	0.16
	100	0.167	0.3333	4.00	8.00	16.00
	200	0.333	0.6667	8.00	16.00	32.00
	300	0.500	1.0000	12.00	24.00	48.00
	400	0.667	1.3333	16.00	32.00	64.00
	500	0.833	1.6667	20.00	40.00	80.00
	600	1.000	2.0000	24.00	48.00	96.00
	700	1.167	2.3333	28.00	56.00	112.00
	800	1.333	2.6667	32.00	64.00	128.00
	900	1.500	3.0000	36.00	72.00	144.00
	1000	1.667	3.3333	40.00	80.00	160.00

TABLA 3.3 *Evaluación del número de Smart Meters respecto al número de medidas en el día.*

Esta relación puede dar la visión de una cantidad considerable de Smart Meters anexados a un concentrador; y este proceso tiene un valor de latencia considerable. Ahora este proceso se repetirá tantas veces la cantidad de los concentradores direccionados hacia un MDMS[31].

Finalmente se muestra la Tabla 3.4, la misma que presenta una relación de los Smart Meters con respecto al tiempo de conexión que mantienen con la red. Estos tiempos son de 2 a 10 segundos, tiempos máximos y mínimos para enviar las medidas correspondientes de cada usuario.

		DURACIÓN DE LA COMUNICACIÓN								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10
NÚMERO DE SMART METERS	1	0.053	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.21	0.24	0.27
	100	5.333	8.00	10.67	13.33	16.00	18.67	21.33	24.00	26.67
	200	10.667	16.00	21.33	26.67	32.00	37.33	42.67	48.00	53.33
	300	16.000	24.00	32.00	40.00	48.00	56.00	64.00	72.00	80.00

	400	21.333	32.00	42.67	53.33	64.00	74.67	85.33	96.00	106.67
	500	26.667	40.00	53.33	66.67	80.00	93.33	106.67	120.00	133.33
	600	32.000	48.00	64.00	80.00	96.00	112.00	128.00	144.00	160.00
	700	37.333	56.00	74.67	93.33	112.00	130.67	149.33	168.00	186.67
	800	42.667	64.00	85.33	106.67	128.00	149.33	170.67	192.00	213.33
	900	48.000	72.00	96.00	120.00	144.00	168.00	192.00	216.00	240.00
	1000	53.333	80.00	106.67	133.33	160.00	186.67	213.33	240.00	266.67

TABLA 3.4 *Evaluación del número de Smart Meters respecto al tiempo de latencia.*

En el transcurso del tiempo se visualiza un promedio que son 6 segundos, los cuales fueron evaluados con 100 Smart Meters, y se puede notar que existe una latencia que es proporcional a la cantidad de medidores conectados al mismo concentrador, todo esto refleja un retardo y posible cuello de botella si no se tuviera una Smart Grid dimensionada para dicho efecto.

Es importante notar, que los Smart Meter de acuerdo a su fabricación pueden enviar ciertos volúmenes de información, pudiendo tomar valores entre 10 a 12 Kbps para el envío de cada medida, entendiéndose medida cada vez que se comunica con la red, mas no cada parámetro medido. Además de una latencia que está de 2 a 10 segundos de retardo[31].

3.2 Compresión de datos.

Se analiza esta opción de la compresión de información para poder aliviar en peso los datos medidos de un Smart Meter y poder enviar la información necesaria para su interpretación y gestión. La compresión de datos busca despreciar información poco necesaria y enviar lo más importante, lógicamente la definición de que es o no importante serán dados por los algoritmos empleados para cada caso. Haciendo referencia a la información de los Smart Meter por ejemplo, el objetivo de la compresión sería disminuir el peso de la información pero con la capacidad de poder ser amplificados en la base de datos central para su análisis correspondiente.

La compresión de datos puede ser gestionada de diversas formas con algunos métodos de compresión, sin embargo se aborda este tema con el método más común que es mediante Wavelets, esta compresión tiene una relación directa con el criterio de entropía, que mide una cantidad de información contenida en una señal o en datos de cualquier tipo y es calculada en función de las probabilidades que aparezcan en

diferentes opciones o circunstancias y además de los valores totales presentes en la señal o información medida[32].

Comprimir una señal o una información significa que se elimina la información redundante sin despreñar datos importantes o de relevancia[32].

El proceso de compresión de datos involucra varios pasos que son:

- Aplicar la transformada Wavelets a los datos originales que produce la señal o la fuente de datos, con tantos niveles de descompresión sean necesarios según la importancia de la señal, por lo general abarcan 5 o 6 niveles.
- El segundo paso es aplicar un umbral al conjunto de coeficientes wavelets obtenidos, este umbral indica el valor absoluto mínimo que deben tener los coeficientes para que no sean considerados insignificantes y sean despreciados de tal forma que no se conviertan en valores nulos o ceros.
- El tercer paso consiste en cuantificar los coeficientes umbralizados. Esto significa que se van a transformar la matriz de números reales, que son obtenidos en el paso anterior, hacia una matriz de números enteros que sirve para el paso siguiente. Este trabajo hace que la cuantificación tenga un efecto de truncamiento irreversible en cada coeficiente, siendo este de menor incidencia que los que suceden en la umbralización.
- Finalmente el cuarto paso con la matriz de números enteros obtenidos de la cuantificación es comprimida y convertida en un flujo de bits con algún dispositivo a modo de codificador y otro como decodificador, esto con la finalidad de poder descomprimir y reconstruir las señales comprimidas anteriormente para el envío y transporte de información.

Para reconstruir los datos que se han comprimido es necesario realizar las transformaciones inversas en cada uno de los pasos que se acaban de enunciar a excepción de la umbralización que es totalmente irreversible[33].

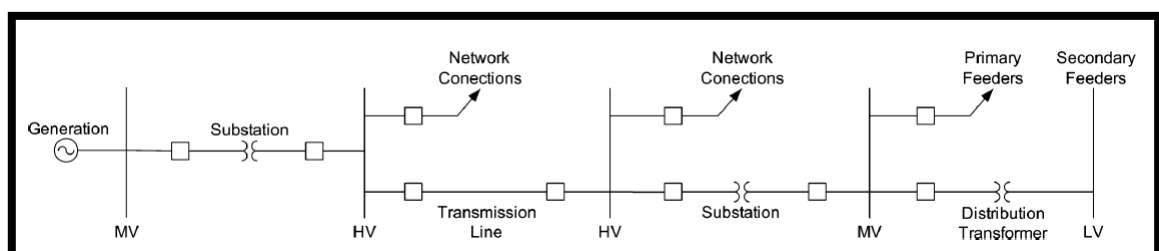


Figura 20: Diagrama de un Sistema Eléctrico de Potencia.

Fuente: Tcheou, M. P., Lovisolo, L., Ribeiro, M. V, Member, S., Silva, E. A. B., Rodrigues, M. A. M.,

Refiriéndose a la figura 20 como ejemplo típico de un sistema eléctrico de potencia, se analizan las perturbaciones y las ondas en función del tiempo, por lo general varía las amplitudes de onda por varios efectos que deben soportar, con el fin de analizar y comprimir señales de los sistemas de energía, es importante utilizar modelos que están con la capacidad de representar con precisión los componentes de señal consistentes con estos fenómenos, que pueden ser clasificados como:

- Armónicos, que son fenómenos de baja frecuencia de estado estacionario que van desde los 60Hz hasta los 3000 Hz, estas perturbaciones son causadas principalmente por semiconductores (dispositivos de electrónica de potencia), hornos de arco, transformadores, cargas con características de flujo de corriente no lineales, máquinas de rotación y en las cargas agregadas, entre otros.
- Transientes, son fenómenos de impulsos u oscilaciones de frecuencia alta, que son oscilaciones superpuestas a las señales de tensión y corriente fundamental. Existen Transientes normales o comunes que son afectaciones por los dispositivos conectados a la red, pero las Transientes anormales corresponden a sucesos no comunes como los rayos, caídas de tensión, fallas en el sistema, maniobras entre otras. El rango de estos valores de frecuencia puede alcanzar cientos de miles de Hz.
- Los Inter-armónicos, resultan ser componentes sinusoidales de frecuencias que no están en múltiplos de la fundamental. Se caracterizan por tener una corta duración y potencia inferior a los componentes fundamentales y armónicas. Estos sucesos se producen debido a la alta disponibilidad de convertidores de potencia y cargas no pulsantes de forma sincrónica con la frecuencia fundamental del sistema eléctrico de potencia.
- Variación de Voltaje, este fenómeno puede ser incremento o caída de tensión RMS, de una duración aproximada de 1 minuto, por lo general estas variaciones se dividen en pequeñas variaciones de tensión o fluctuaciones de tensión y grandes variaciones con huecos de tensión o hundimientos, sobretensiones o picos e interrupciones[34].

Dentro de una Smart Grid, existen una gran cantidad de equipos medidores o controladores de energía los cuales despliegan una gran cantidad de información en tiempo real. Por lo tanto esta información tiene un impacto en la infraestructura de comunicación y su ancho de banda, por ejemplo un segundo de forma de onda requiere 10 MB de espacio para ser enviado, recibido y almacenado. Además de las formas de onda de tensión y corriente, el equipo de monitoreo puede mantener parámetros asociados con las normas de calidad de energía, el aumento de la demanda de espacio de almacenamiento, ancho de banda de canal para la comunicación de datos y menor retardo de comunicación. Para aplicaciones de tiempo de restricciones en las redes inteligentes, que no satisfagan estas demandas pueden resultar en pérdidas de eficiencia, funcionamiento incorrecto, y eventualmente daños a equipos de energía[34].

“Hay que ser conscientes de que los objetivos para la compresión de señales eléctricas son muy diferentes a los de otros tipos de señales. Por un lado, al evaluar el rendimiento de sonido y sistemas de compresión de imágenes con pérdidas, lo que interesa es la cantidad de información que puede ser eliminado de la señal original de manera que el oído humano o el sistema visual no perciben la información que falta. Por otro lado, al comprimir las formas de onda de señales eléctricas, hay que verificar si la distorsión introducida por la técnica de compresión conduce a un fallo o perturbación mal interpretación por los ingenieros expertos o sistemas de análisis de fallas automatizados. Por lo general, el análisis de las grabaciones de fallos de señales eléctricas abarca la detección, clasificación, análisis de eventos, la identificación de las fuentes subyacentes, ubicación de origen, y análisis de la operación del sistema de protección y disyuntores[34]”¹⁵

Para hacer un ejemplo grafico se tomaran datos numéricos de un archivo cualquiera, de tal forma que por sus magnitudes y amplitudes consumirá una velocidad de comunicación determinada, que para el caso de los Smart Meter serán cientos o miles de dispositivos emitiendo una señal de comunicación y medida. Los datos enviados serán de forma semejante a los de la figura siguiente:

¹⁵ Tcheou, M. P., Lovisolo, L., Ribeiro, M. V., Member, S., Silva, E. A. B., Rodrigues, M. A. M., ... Diniz, P. S. R. (2014). The Compression of Electric Signal Waveforms for Smart Grids : State of the Art and Future Trends, 5(1), 291–302.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
2	TIEMPO	VOLTAJE	CORRIENTE	FACTOR DE POTENCIA	FRECUENCIA	POTENCIA REAL	CONSUMO	POTENCIA REACTIVA	POTENCIA APARENTE	ANGULO
3		V	I	Fp	Hz	P	kw/h	Q	S	grados
4	00:00:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
5	00:15:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
6	00:30:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
7	00:45:00	121	0.5	0.95	60	57.48	0.23	18.89	60.5	18.19
8	01:00:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
9	01:15:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
10	01:30:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
11	01:45:00	121	0.5	0.95	60	57.48	0.23	18.89	60.5	18.19
12	02:00:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
13	02:15:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
14	02:30:00	121	0.5	0.95	60	57.48		18.89	60.5	18.19
15	02:45:00	121	0.5	0.95	60	57.48	0.23	18.89	60.5	18.19

Figura 21: Tabulación manual de valores medidos por un Smart Meter.

Fuente: Autor

Cuando estos datos obtenidos de la grafica anterior son evaluados por algún método de compresión tienen un comportamiento como el que se muestra en la Figura 22, que es una grafica adimensional pero que muestra una amplitud en el eje de las ordenadas que representaría la cantidad de ancho de banda que consumiría el envío de esa información.

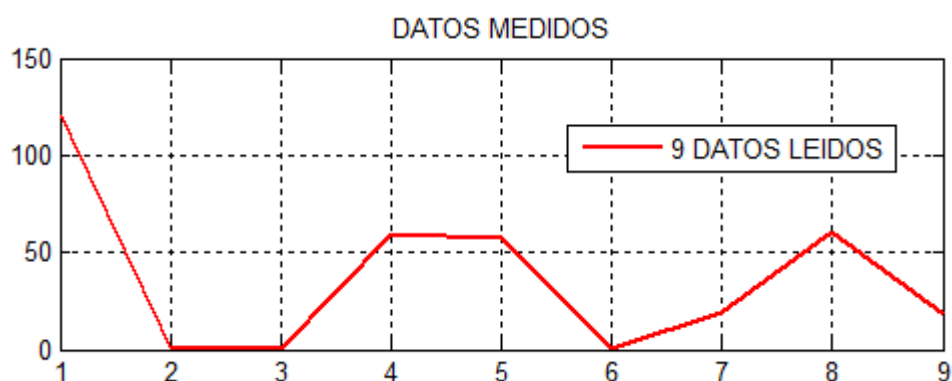


Figura 22: Amplitud de mediciones tomadas desde un Smart Meter.

Fuente: Autor

Después de simular una compresión de la información original se espera tener una disminución considerable de la amplitud necesaria para el envío de la información. Esto significa que los datos enviados por el Smart Meter podrían ser comprimidos en los concentradores y así ocupar menos ancho de banda para optimizar los recursos de comunicaciones y evitar cuellos de botella con las abundantes mediciones y medidores. Como se expresa en la siguiente grafica los valores disminuyeron en comparación con los datos originales.

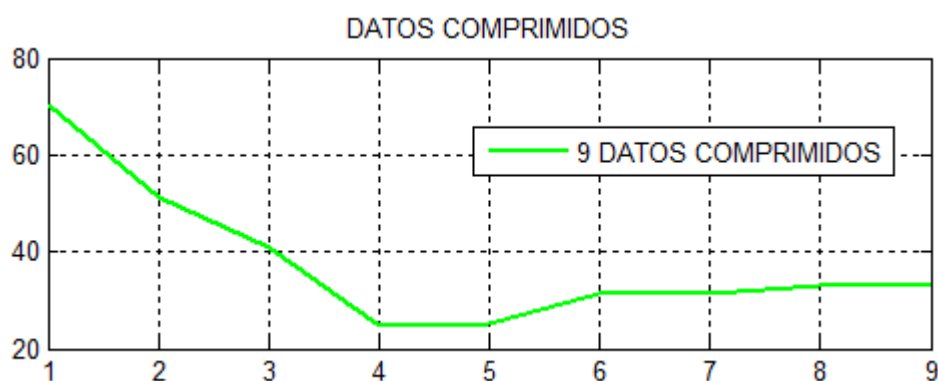


Figura 23: Compresión de mediciones a través de la función Wavelet.

Fuente: Autor

La disminución de los valores en el eje de las ordenadas es evidente, por lo tanto necesitaría un menor ancho de banda para el envío de los datos medidos. Es necesario mencionar que los datos no han sido obviados o perdidos, están disponibles para su reconstrucción y volver a los valores originales, esto hace posible volver a la señal inicial y evaluar o disponer de esa información como sea necesaria. Esta funcionalidad se expone en la grafica siguiente, que es coincidente la Figura 22.

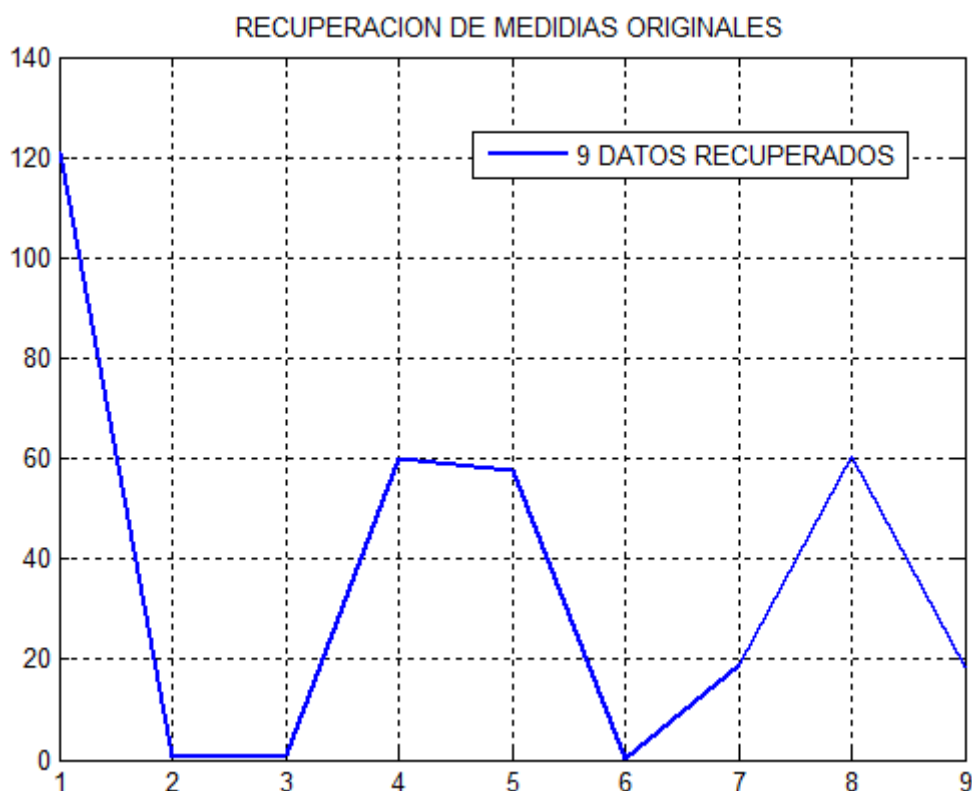


Figura 24: Recuperación de los datos originales medidos por el Smart Meter.

Fuente: Autor

Los valores medidos por el Smart Meter son ejemplificados en la Figura 21, mediciones o valores que pueden ser obtenidos en descompresión de las señales, esto lo muestra la grafica siguiente, que son las mismas mediciones que las originales.

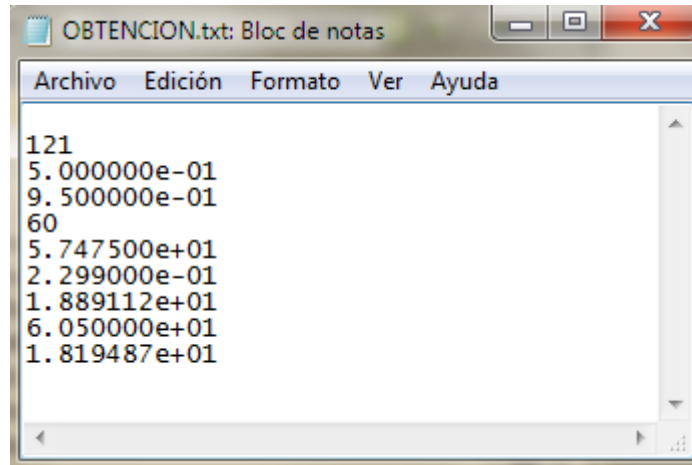


Figura 25: Recuperación de medidas originales.

Fuente: Autor

Como resultado de esta simulación queda claro que la compresión de datos aliviaría en mucho la transmisión de la información en los trayectos de comunicación, pero a la vez pudiendo obtener la información original para su análisis, gestión y evaluación.

3.3 Comparación de rendimiento entre arquitecturas de comunicación.

El rendimiento de un sistema de arquitecturas de comunicación dentro de una Smart Grid es evaluado en varios aspectos como el costo de su implementación, capacidad de comunicación, ancho de banda necesario, distancia de comunicación, entre otros parámetros. Los cuales se mostrarán en sus correspondientes graficas para su evaluación y entendimiento de cada una.

Los valores que se tomarán de referencia como bases para todas las simulaciones son las siguientes:

- Concentradores distribuidos uniformemente en un área de 100 x 100 Km, el centro de operaciones será ubicado en el centro de la localidad.
- Esta simulación tiene una cantidad de 1 millón de habitantes, asumiendo que cada familia o grupo familiar posee 4 integrantes, y tienen un Smart Meter por familia. El número de Smart Meters cubiertos por cada concentrador es de 100 como promedio.
- Actualmente, un Smart Meter consume al año 400 Mega Bytes para enviar su

información a su respectivo concentrador, considerando que son enviados cada 15 minutos, cada envío de información necesita 12 Kb de datos[13].

- Se llevarán a cabo simulaciones con varios valores para N , que van de 1000 a 10000.
- El costo de implementación de cada MDMS se asume que es de 100 \$
- Se considera una relación de envío de información de $\alpha = 0,1$. Esto es datos medidos entre datos enviados al centro de operaciones.
- El costo unitario para el ABDP se asume como $\beta = 100\$$ (por Mbps x Km).
- El ancho de banda necesario entre cada centro de operaciones distribuida y la central es $\gamma = 100Mbps$.
- Distancia promedio entre un concentrador y la central MDMS es estimada como $\bar{D} = 40Km$ ya que la zona que estimamos es un cuadrado.

3.3.1 Costo de las Arquitecturas de Comunicación.

A continuación se analizarán las arquitecturas de comunicación de forma parcial y finalmente en conjunto. Haciendo referencia al costo en función del incremento del número de concentradores en la Smart Grid. Se mostrará además la ecuación que gobierna la gráfica y la descripción de sus componentes.

3.3.1.1 Arquitectura Centralizada

La Arquitectura de Comunicación Centralizada presenta un costo de comunicación que crece en forma lineal según el número de concentradores, pero este crecimiento no es pronunciado como se esperaría, al contrario tiene un incremento lento, de pendiente semejante a cero, por lo que comparada con las otras arquitecturas podría parecer una línea recta paralela al eje de las abscisas. Como se puede apreciar en la gráfica siguiente tenemos un costo que varía según el incremento del número de concentradores.

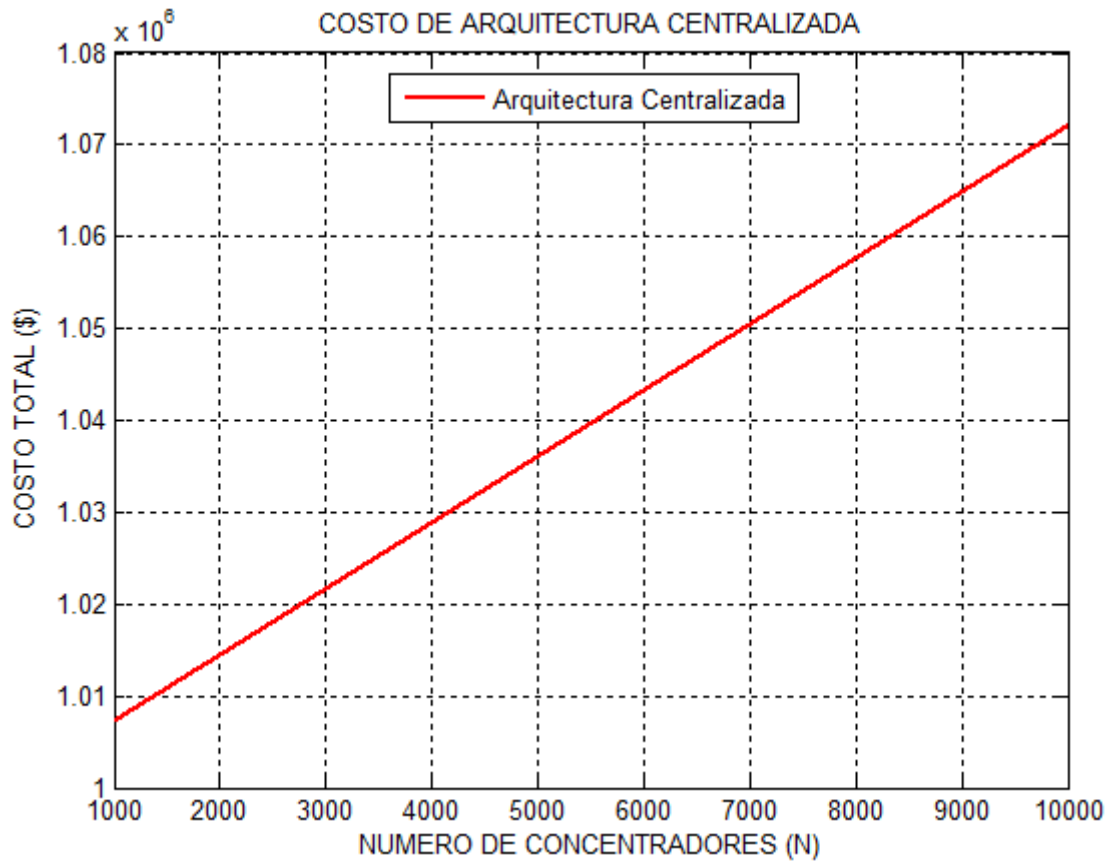


Figura 26: Costo de la Arquitectura Centralizada en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor

La Figura 26 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$CostoC = \frac{\lambda DN}{\beta} + F_0. \quad (25)$$

Donde:

- λ es igual a la velocidad de comunicación entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- D es la distancia entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.
- β es el costo unitario para el ABDP. Unidad de medida (Mbps * Km)/\$.
- F_0 es el costo de implementación de un MDMS. Unidad de medida \$.

3.3.1.2 Arquitectura Distribuida

Por otra parte se tiene el costo de Arquitectura de Comunicación Distribuida descrita

en la Figura 27, en la cual se muestra un incremento del costo en forma exponencial en función de la variación del número de concentradores. Este incremento es considerable según dicha variación, a diferencia de la arquitectura de comunicación centralizada.

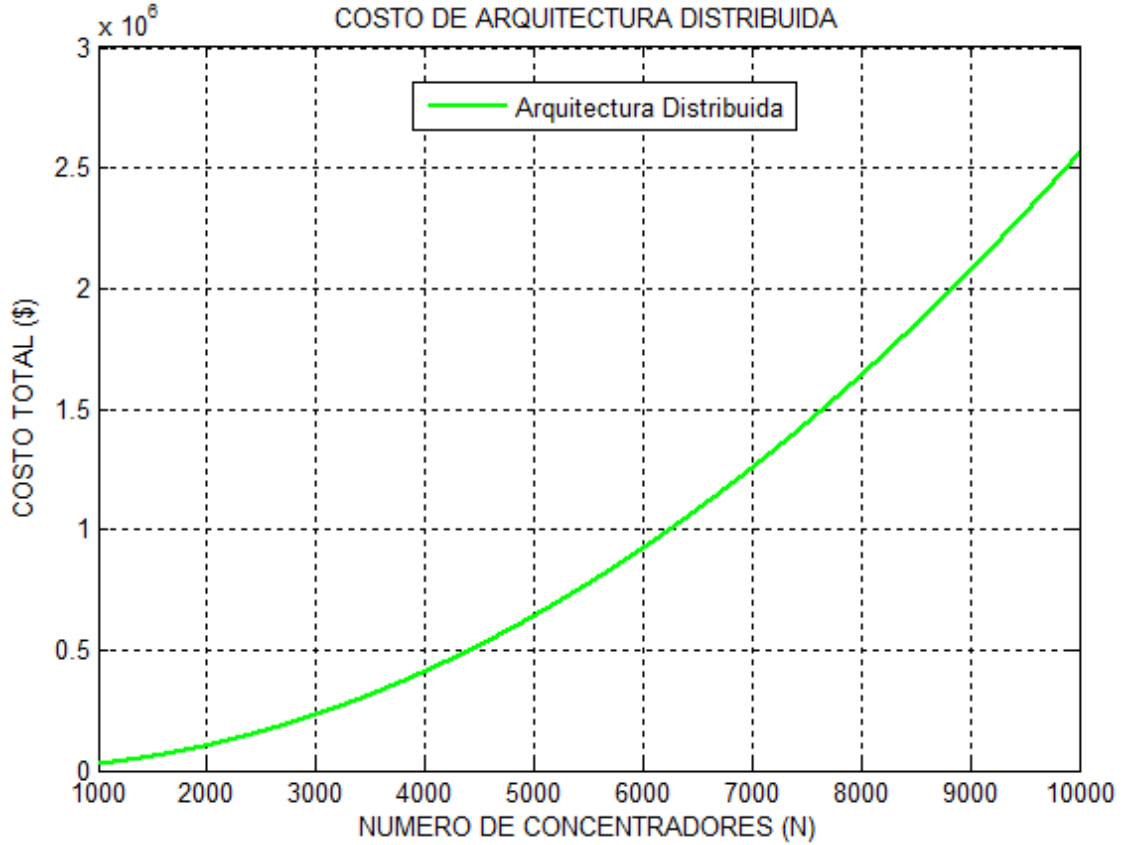


Figura 27: Costo de la Arquitectura Distribuida en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor

La Figura 27 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$CostoD = \left(\frac{\bar{\lambda} \bar{D} N}{\beta} \right)^{\frac{2}{3}} \bar{F}^{\frac{1}{3}} + \frac{\alpha \bar{\lambda} \bar{D} N}{\beta}. \quad (26)$$

Donde:

- $\bar{\lambda}$ es igual a la velocidad de comunicación promedio entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- \bar{D} es la distancia entre el concentrador y el MDMS central. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.
- β es el costo unitario para el ABDP. Unidad de medida (Mbps * Km)/\$.
- \bar{F} es el costo promedio de implementación de un MDMS distribuido. Unidad

de medida \$.

- α relación de comunicación que considera datos medidos entre datos enviados.

3.3.1.3 Arquitectura Totalmente Distribuida

La Figura 28 muestra el comportamiento de la Arquitectura Totalmente Distribuida, que responde a la variación del número de concentradores de manera exponencial, muy semejante a la Arquitectura Distribuida pero con valores un poco más altos en cuanto al costo final.

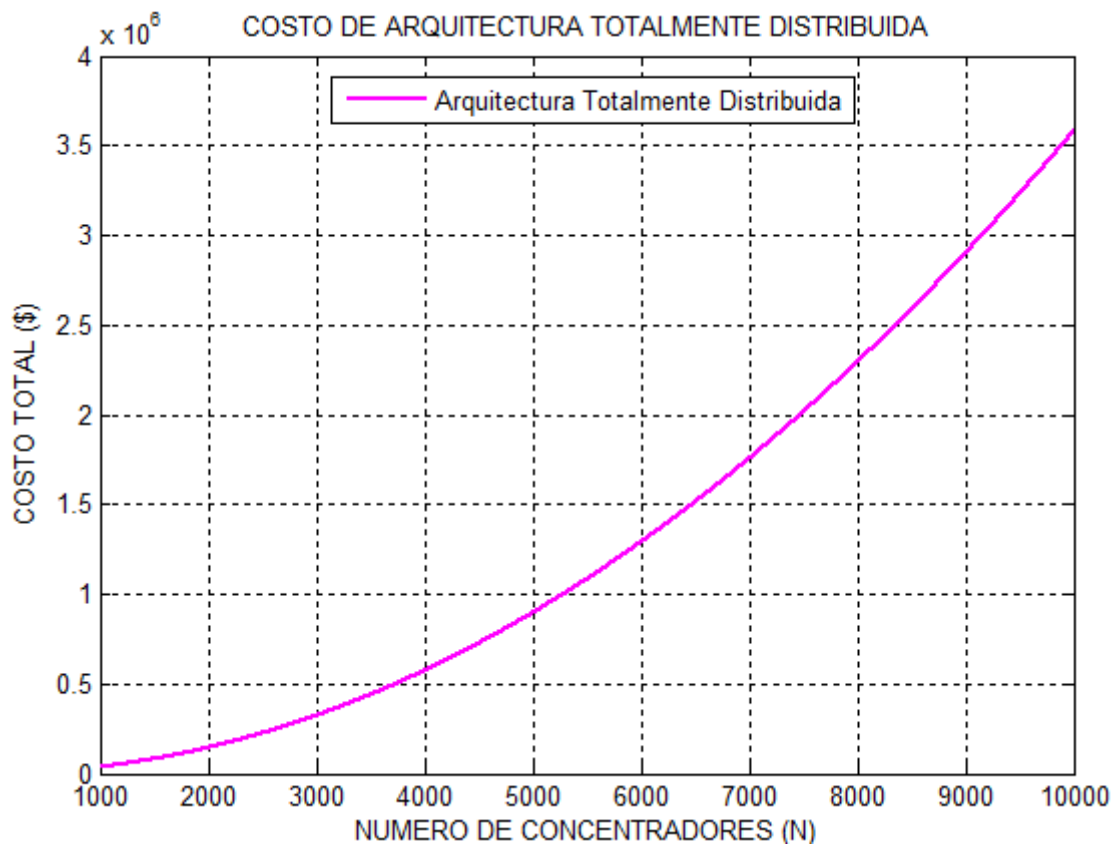


Figura 28: Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor

La Figura 28 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$CostoF = \left(\frac{\lambda \bar{D} N}{\beta} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\gamma \bar{D}}{\beta} + \bar{F} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (27)$$

Donde:

- $\bar{\lambda}$ es igual a la velocidad de comunicación promedio entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- \bar{D} es la distancia entre el concentrador y el MDMS central. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.
- β es el costo unitario para el ABDP. Unidad de medida (Mbps * Km)/\$.
- \bar{F} es el costo promedio de implementación de un MDMS distribuido. Unidad de medida \$.
- γ es el ancho de banda necesario para la información intercambiada entre un servidor distribuido y un servidor centralizado. Unidad de medida Mbps.

3.3.1.4 Comparación de Arquitecturas.

En los tres análisis anteriores se vio el comportamiento de cada arquitectura, para la figura siguiente poseemos las tres arquitecturas en la misma gráfica lo cual confirma lo anteriormente descrito, sin embargo es prudente notar que la Arquitectura Centralizada es la más costosa en valores menores a 5000 concentradores aproximadamente, por lo tanto su implementación desde el punto de vista económico con cantidad de Smart Meter resultaría conveniente para cantidades superiores a los 6000 concentradores, es decir aproximadamente 600000 Smart Meters.

Las curvas de las arquitecturas Distribuida y Totalmente Distribuida son muy semejantes en forma y valores del costo, sin embargo cuando va creciendo la cantidad de concentradores resulta ser más económica la Arquitectura Distribuida frente a la Arquitectura Totalmente Distribuida puesto que se va ampliando la diferencia del costo.

Se puede notar además un punto de equilibrio donde las tres arquitecturas podrían ser útiles en función del costo, esto es en el intervalo de los 5500 a 6500 concentradores, puesto que no habría una variación mayor del costo en relación a la cantidad de usuarios que se puedan conectar a esta Smart Grid.

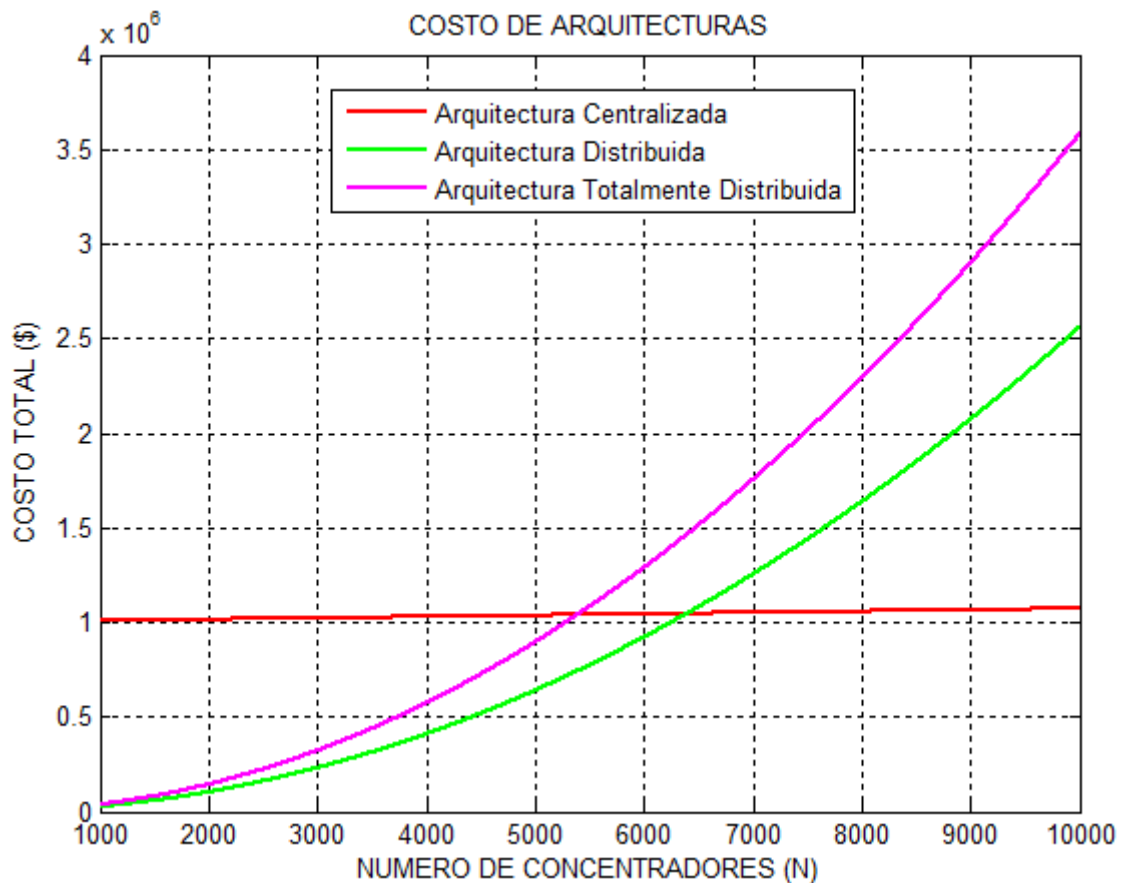


Figura 29: Costo de las tres Arquitecturas en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor.

Como se mencionó anteriormente, la Arquitectura Centralizada parece mantener su costo total constante frente a la variación de los concentradores, a pesar de ser un crecimiento lineal es poco sensible al incremento de sus Smart Meters añadidos a la red.

Nótese además que las gráficas de las Arquitecturas Distribuida y Totalmente Distribuida tienen un costo muy bajo en los valores de 1000 a 3000 concentradores, esto indica que la inversión inicial es mucho más fuerte en la Arquitectura Centralizada.

Para ejemplificar estos valores, se puede referir a la ciudad de Quito – Ecuador, con una población de 2’576.000 habitantes[35], se considera que cada familia o usuario se compone de 4 personas, tendrían 644000 Smart Meters en la ciudad, asignando 100 Smart Meter a cada concentrador se tendrían 6440, si se ubica este valor en la gráfica se puede notar que para la ciudad con esta cantidad de habitantes es recomendable una Arquitectura Centralizada o Distribuida, que por costos estaría en el mismo rango de implementación.

3.3.2 Ancho de Banda para las Arquitecturas de Comunicación

El valor ABDP es el ancho de banda requerido por cada kilómetro de distancia y para este caso se analizará en función de la variación de concentradores, puesto que estos valores afectan el comportamiento de cada arquitectura para su evaluación.

3.3.2.1 Ancho de Banda para la Arquitectura Centralizada

El valor ABDP es creciente de forma lineal con el incremento de los concentradores, es un comportamiento muy similar al costo de la Arquitectura Centralizada. Nótese que este incremento de valor ABDP es en función de los concentradores, pero inicialmente el sistema de comunicaciones ya posee por defecto sus valores de ancho de banda y su respuesta en base a la distancia.

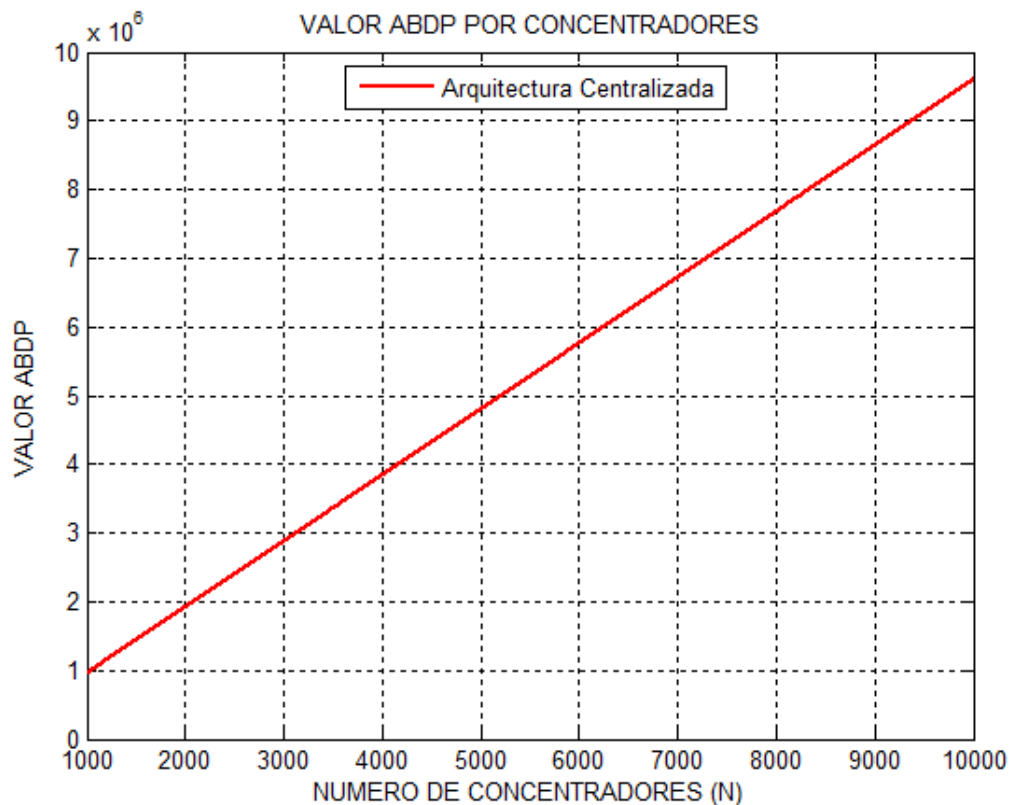


Figura 30: Ancho de Banda (Centralizada) en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor.

La Figura 30 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$ABDPC = \lambda DN. \quad (28)$$

Donde:

- λ es igual a la velocidad de comunicación entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- D es la distancia entre el concentrador y el MDMS central. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.

3.3.2.2 Ancho de Banda para la Arquitectura Distribuida

De igual forma que la gráfica del costo, la arquitectura distribuida presenta una curva exponencial creciente en función de la cantidad de concentradores. Como se puede notar los valores de ABDP son considerablemente más altos que los de la Arquitectura Centralizada y este comportamiento sería una desventaja para su utilización pues la implementación de un sistema de comunicación de un ancho de banda tan alto no resultaría ser viable o por lo menos no conveniente.

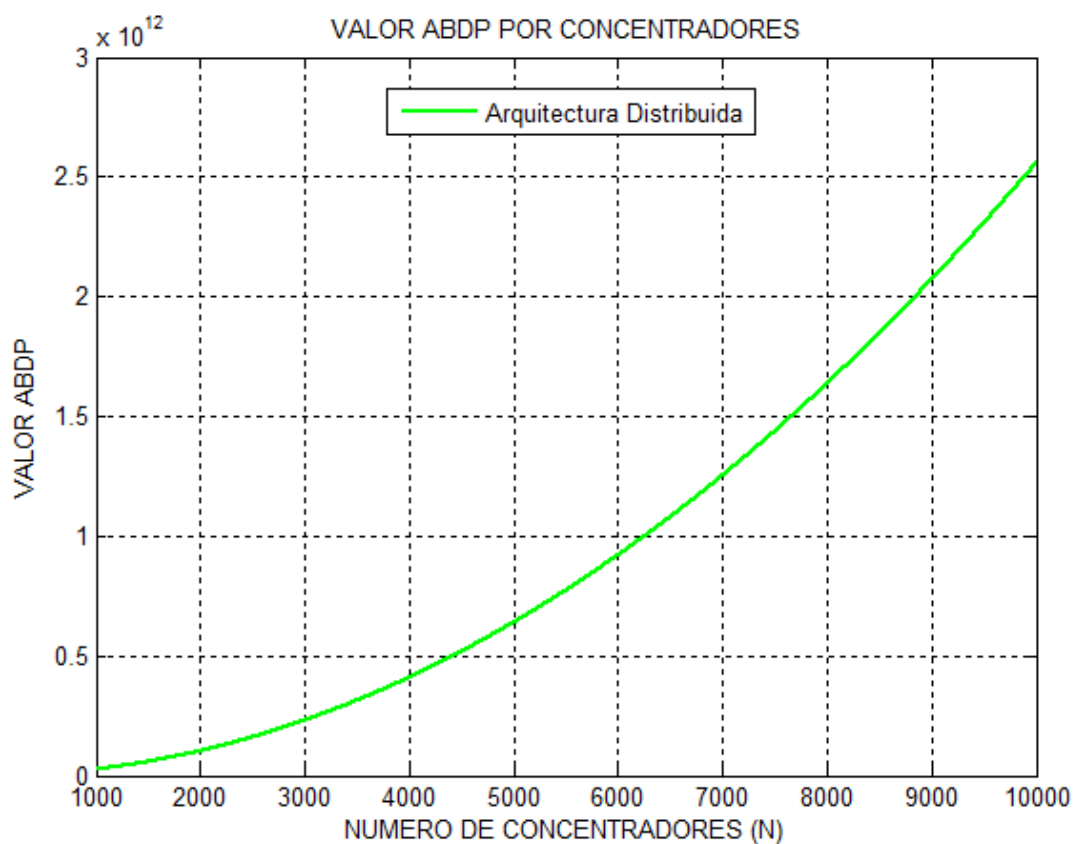


Figura 31: Ancho de Banda (Distribuida) en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor.

La Figura 31 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$ABDPD = (\bar{\lambda}\bar{D}N)^{\frac{2}{3}}(\bar{F}\beta)^{\frac{1}{3}} + \alpha\bar{\lambda}\bar{D}N. \quad (29)$$

Donde:

- $\bar{\lambda}$ es igual a la velocidad de comunicación promedio entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- \bar{D} es la distancia entre el concentrador y el MDMS central. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.
- β es el costo unitario para el ABDP. Unidad de medida (Mbps * Km)/\$.
- \bar{F} es el costo promedio de implementación de un MDMS distribuido. Unidad de medida \$.
- α relación de comunicación que considera datos medidos entre datos enviados.

3.3.2.3 Ancho de Banda para la Arquitectura Totalmente Distribuida

La Figura 32 muestra el incremento del valor de ancho de banda por kilómetro según la variación o incremento de la cantidad de concentradores, como se puede notar al igual que en la Arquitectura Distribuida los valores ABDP son altos pero menores. Este comportamiento de la curva debe ser tomado en cuenta para la decisión de implementación de una u otra arquitectura.

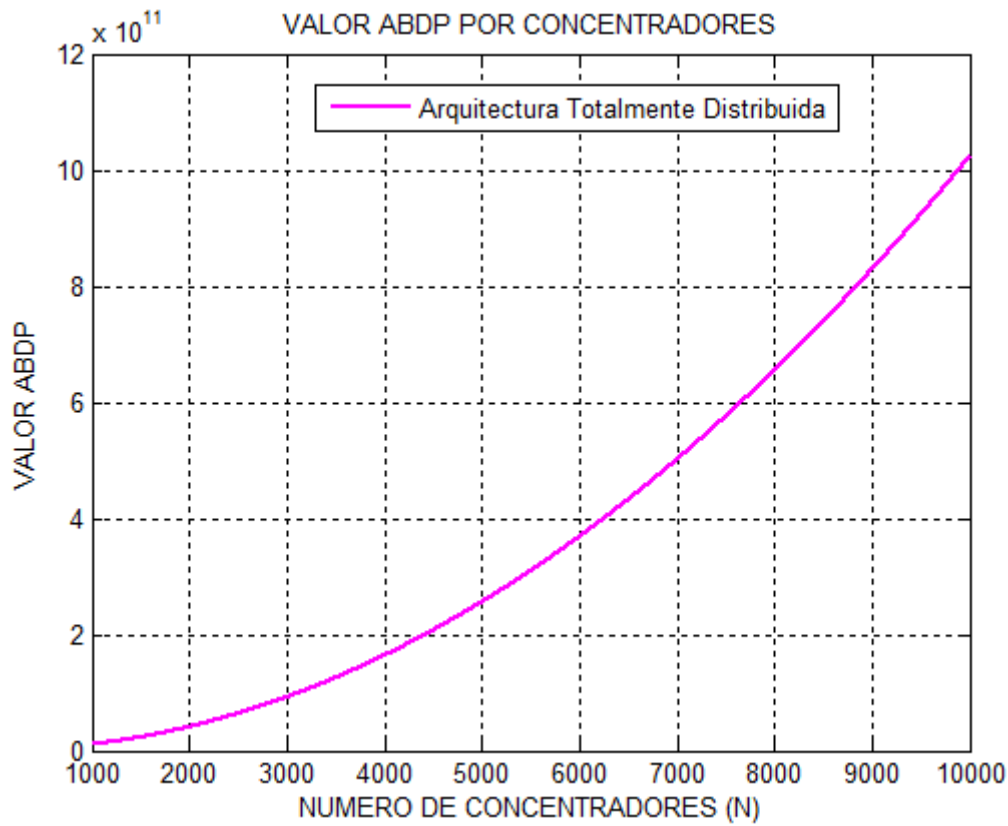


Figura 32: Ancho de Banda (Totalmente Distribuida) en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor.

La Figura 32 atiende a la siguiente expresión matemática:

$$ABDPD = (\bar{\lambda} \bar{D} N)^{\frac{2}{3}} \left(\gamma \bar{D} \left(\frac{\beta}{\gamma \beta \bar{D} + \bar{F}} \right)^{\frac{2}{3}} + \left(\frac{\gamma \beta \bar{D} + \bar{F}}{\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \right). \quad (30)$$

Donde:

- $\bar{\lambda}$ es igual a la velocidad de comunicación promedio entre el concentrador y el centro de operaciones. Unidad de medida Mbps.
- \bar{D} es la distancia entre el concentrador y el MDMS central. Unidad de medida Km.
- N es la variación del número de concentradores.
- β es el costo unitario para el ABDP. Unidad de medida (Mbps * Km)/\$.
- \bar{F} es el costo promedio de implementación de un MDMS distribuido. Unidad de medida \$.
- γ es el ancho de banda necesario para la información intercambiada entre un servidor distribuido y un servidor centralizado. Unidad de medida Mbps.

3.3.2.4 Comparación de Arquitecturas.

Los comportamientos de las figuras anteriores muestran claramente la diferencia de valores existentes entre cada una de ellas, siendo la Arquitectura Distribuida la que demanda un mayor valor ABDP, por lo tanto es la que más ancho de banda consumiría dentro de la red de comunicación. A diferencia de la Arquitectura Centralizada, su valor prácticamente es la mitad que las dos arquitecturas distribuidas.

Entre las arquitecturas distribuidas, mientras mayor sea el número de concentradores mayor será la diferencia entre ellas, prácticamente la Arquitectura Distribuida requiere el doble de ancho de banda frente a la Arquitectura Totalmente Distribuida.

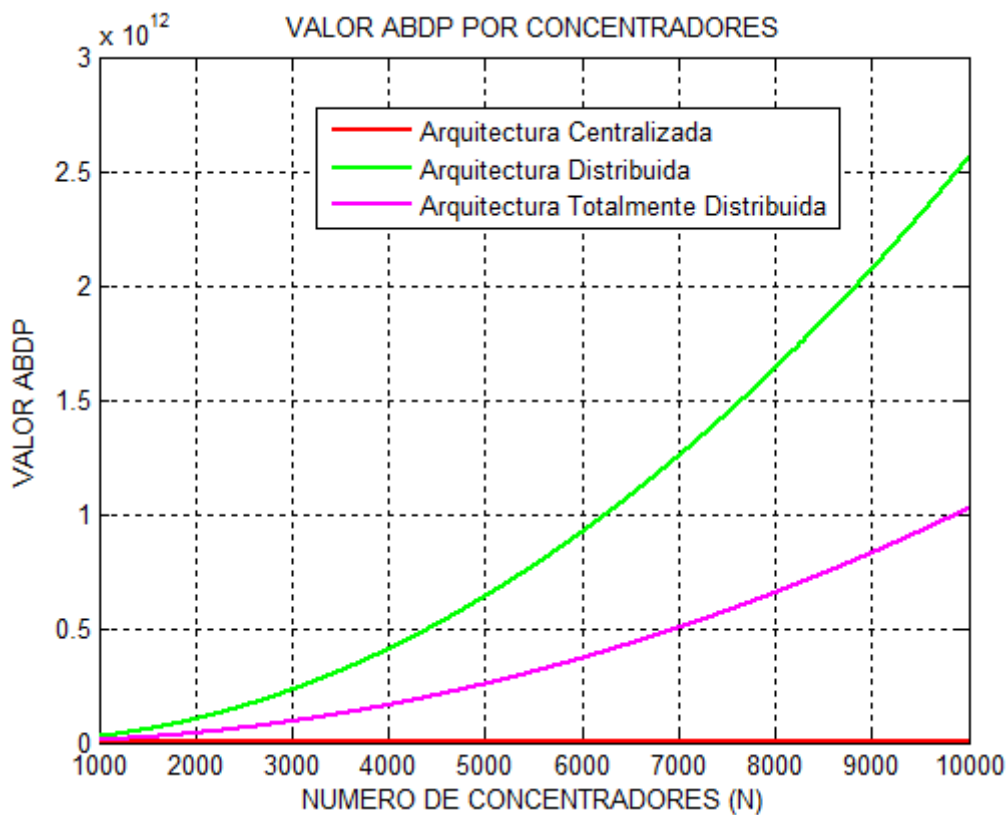


Figura 33: Ancho de Banda de las Arquitecturas en función del número de Concentradores.

Fuente: Autor.

La figura 33 corresponde a la formulación de las gráficas parciales de cada arquitectura, anteriormente expuesta.

3.3.3 Costo de las Arquitecturas en función de la Velocidad de comunicación.

En este aspecto de análisis ya no se toma en cuenta a la Arquitectura de Comunicación Centralizada puesto que no tiene una variación en la velocidad de comunicación, como si lo tendrían las Arquitecturas Distribuida y Totalmente Distribuida.

Esta variación de la velocidad de comunicación responde a la cantidad de datos que se decidan enviar, es decir, se pueden medir 10 datos de cada Smart Meter pero solo ser enviados a las MDMS centrales o distribuidas una parte de esas medidas. En función de esos datos pueden variar los datos velocidad de comunicación y por supuesto el costo total. Además como ya se analizó anteriormente se dispone de una herramienta de compresión de datos que puede mejorar las condiciones actualmente simuladas.

3.3.3.1 Costo de la Arquitectura Distribuida.

La gráfica muestra una curva creciente exponencial, indicando el costo en función de la velocidad que requiere la red para el envío de toda la información medida. Estos valores de velocidad de ancho de banda están en función de la cantidad de medidas que se desean tomar en cuenta, la cantidad de Smart Meters conectados a la red y lógicamente la distancia que debe atravesar la comunicación.

Si se asumiera que se enviarían la mitad de los datos medidos se requeriría una velocidad de 6 Mbps con un costo determinado por la gráfica, pero si enviamos la totalidad de datos el valor del costo es 4 veces mayor aproximadamente.

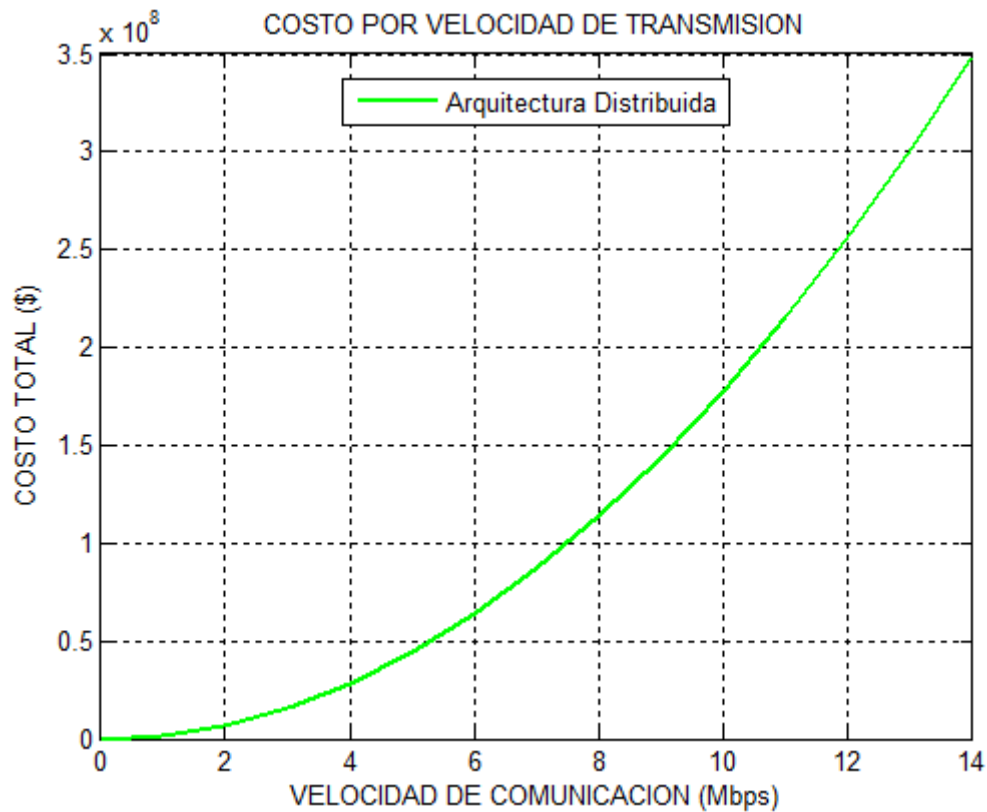


Figura 34: Costo (Distribuida) en función de la Velocidad de Comunicación.

Fuente: Autor.

La Figura 34 responde a (26) con los mismos parámetros descritos anteriormente.

3.3.3.2 Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida.

Esta arquitectura de comunicación tiene un comportamiento similar que la anterior pero con un costo mayor para los mismos valores de velocidad de comunicación. Y utilizando el mismo razonamiento de la cantidad de datos medidos el valor aproximado que crece el costo sigue siendo 4 veces.

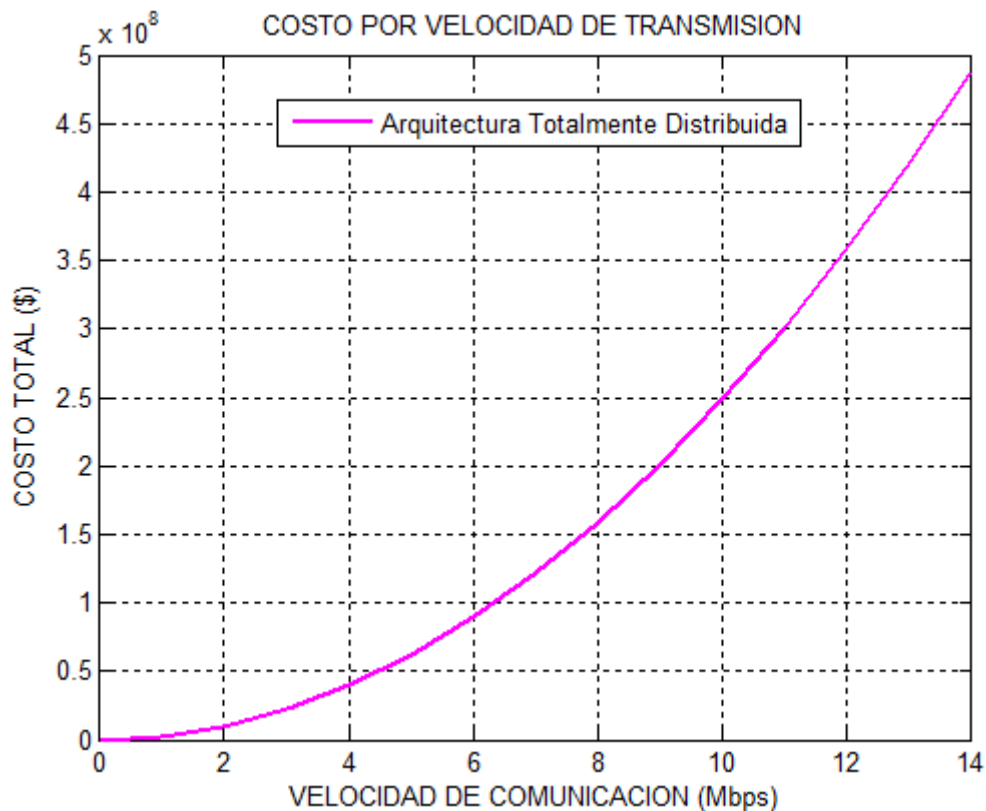


Figura 35: Costo (Totalmente Distribuida) en función de la Velocidad de Comunicación.

Fuente: Autor.

La Figura 35 responde a (27) con los mismos parámetros descritos anteriormente.

3.3.3.3 Comparación de Arquitecturas.

La Figura 36 muestra el costo respondiendo a la variación de la velocidad de comunicación de los datos medidos por el Smart Meter, esta variación de la velocidad depende de la cantidad de información que se desee recibir en el Centro de Operaciones, esto quiere decir que ya se puede hablar de una gestión de información para llegar a un equilibrio entre la cantidad de datos realmente necesarios para la empresa que suministra el servicio eléctrico y el costo según la arquitectura.

Es fácil notar además que la Arquitectura Totalmente Distribuida tiene un costo más alto en toda su trayectoria, sin embargo no es considerable la diferencia de costos entre una y otra, al menos si se gestiona la información y se envía la mitad de datos la variación del costo es poco significativa, por lo tanto el costo desde esta perspectiva no sería un elemento de juicio para determinar ocupar una u otra arquitectura sino la funcionalidad y capacidad de la Smart Grid.

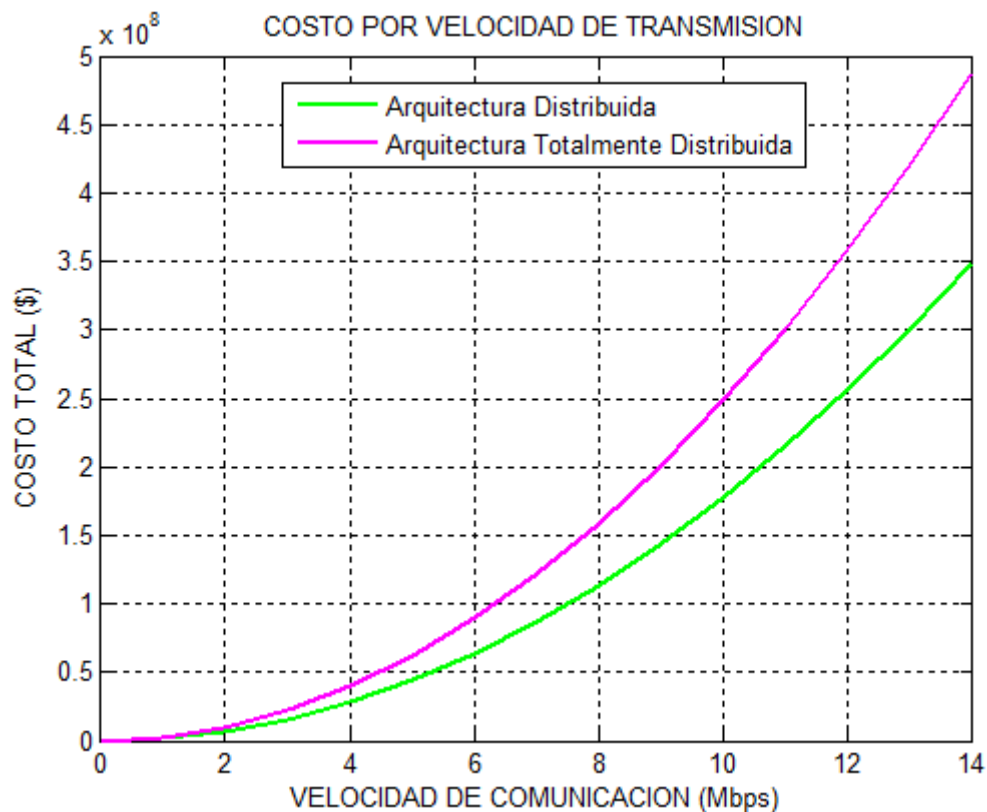


Figura 36: Evaluación de las dos Arquitecturas en función de la velocidad.

Fuente: Autor.

Los valores para la velocidad de comunicación es de 12 Mbps sin ningún tipo de gestión de datos y asumiendo el envío de datos cada 15 minutos.

La Figura 36 corresponde a la formulación de las gráficas parciales de cada arquitectura, anteriormente expuesta.

3.3.4 Costo de las Arquitecturas en función de la distancia

Para la arquitectura centralizada no existe una variación de distancia promedio, solo existe la distancia punto a punto, por lo tanto no es tomada en cuenta en este análisis.

3.3.4.1 Costo de la Arquitectura Distribuida.

Respecto a las dos arquitecturas restantes si hay una variación de la distancia promedio que pueden ser dependientes de la topología de las ciudades, nuevamente el ejemplo de la ciudad de Quito – Ecuador es apropiado pues es una ciudad larga y poco ancha, donde sus dimensiones aproximadas son 75 Km de largo y 8 Km de ancho, por lo tanto la distancia promedio estaría entre los 30 y 40 Km[36].

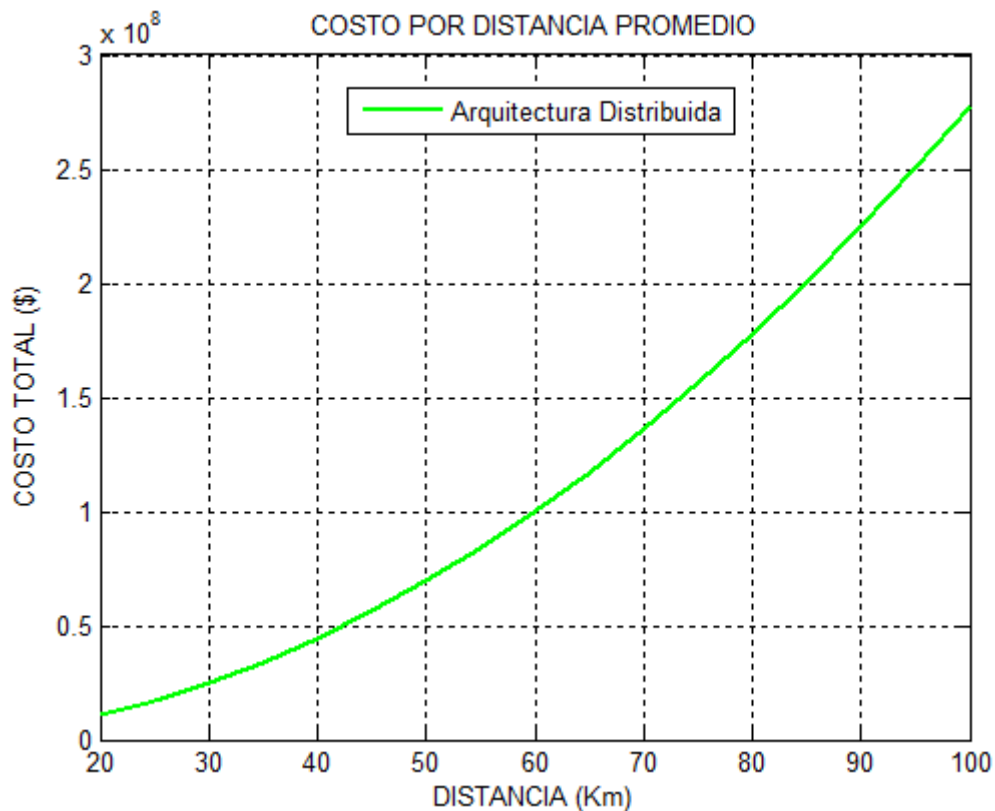


Figura 37: Costo (Distribuida) en función de la Distancia Promedio.

Fuente: Autor.

Dentro de la Arquitectura Distribuida el costo en función de la distancia promedio es relativamente bajo mientras menor sea la distancia. A diferencia de la Arquitectura Centralizada que la distancia a ser considerada no es la promedio sino la distancia total desde el concentrador hacia el MDMS centralizado.

La Figura 37 responde a (26) con los mismos parámetros descritos anteriormente.

3.3.4.2 Costo de la Arquitectura Totalmente Distribuida.

El análisis de la Arquitectura Totalmente Distribuida no es diferente a la anterior arquitectura, pues responde al mismo comportamiento que basa su variación del costo en función de la distancia promedio, con la salvedad que es un poco más costosa frente a las mismas variaciones de distancia. Este efecto podrá ser notado en la Figura 39 donde se comparan las dos gráficas de manera simultánea.

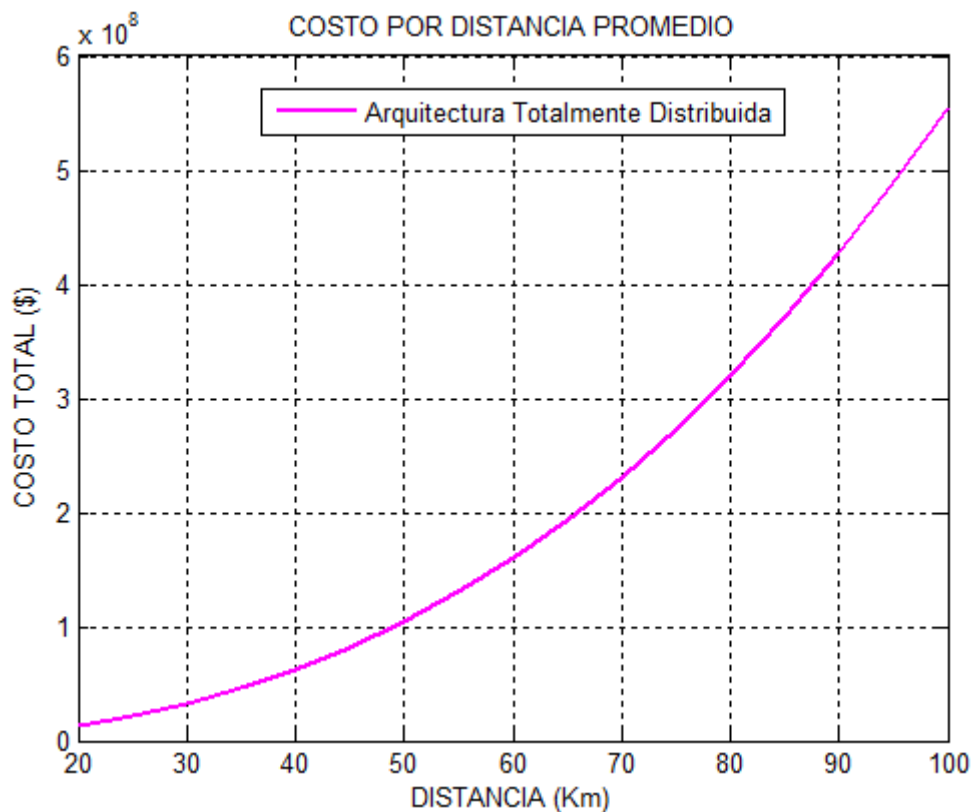


Figura 38: Costo (Totalmente Distribuida) en función de la Distancia Promedio.

Fuente: Autor.

La Figura 38 responde a (27) con los mismos parámetros descritos anteriormente.

3.3.4.3 Comparación de Arquitecturas.

Las curvas de las arquitecturas distribuida y totalmente distribuida muestran igual comportamiento con el incremento de la distancia entre los concentradores y el centro de operaciones o del MDMS central. Si se maneja el mismo criterio de una ciudad con una distancia promedio de 40 Km la diferencia entre una arquitectura u otra es relativamente mínima, pero si se compara con la distancia total de la Arquitectura Centralizada este valor de costo sería excesivamente más alto.

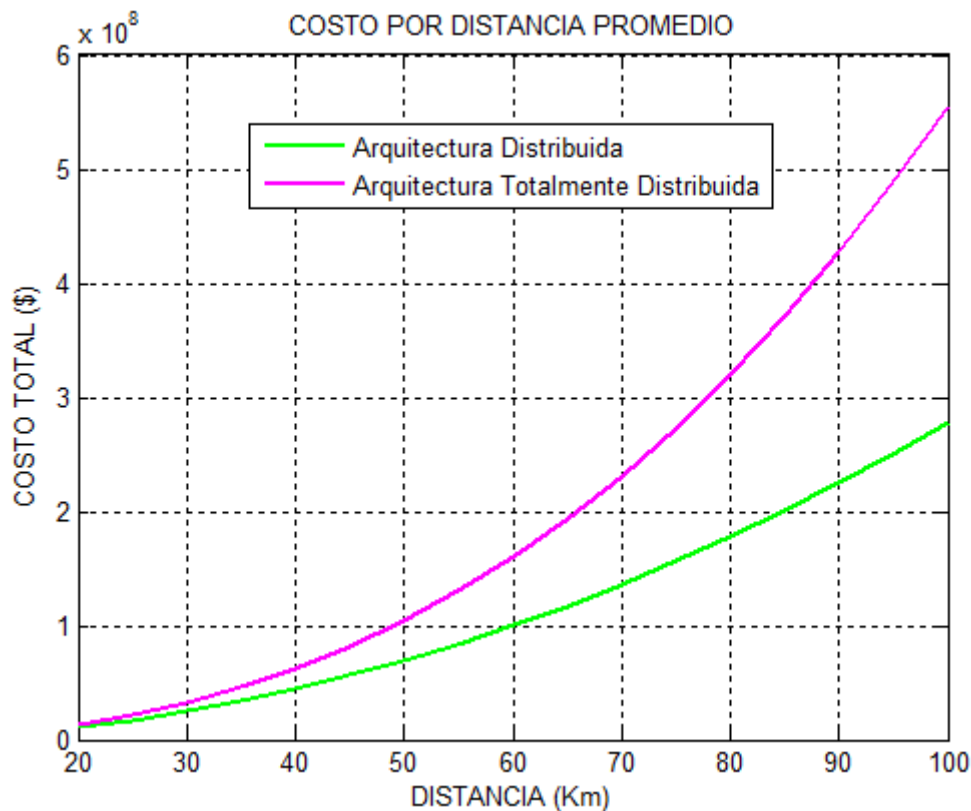


Figura 39: Evaluación del Costo de las Arquitecturas en función de la Distancia Promedio.

Fuente: Autor.

Es preciso tener estos datos y aspectos de comportamiento de cada arquitectura para poder determinar qué tipo de arquitectura utilizar de acuerdo a las necesidades de cada empresa suministradora de energía eléctrica. Esto a su vez atiende a fenómenos físicos, la distribución geográfica de las ciudades, y lugares donde se necesite hacer un minucioso control de calidad de energía o lugares rurales que solo necesiten la toma de lecturas diarias, semanales o mensuales.

La Figura 39 corresponde a la formulación de las gráficas parciales de cada arquitectura, anteriormente expuesta.

3.4 Gestión de datos.

Para describir las gráficas de la simulación es necesario primero entender el objetivo de la gestión de datos o de la información medida mediante el Smart Meter.

La gestión de datos corresponde a la unión de los procedimientos de recolección de datos y las personas mediante las cuales se procesa la información medida o recolectada. Este proceso consiste en recolectar los datos provenientes del Smart Meter, manipular dicha información, almacenar los datos, recuperación de la información que pudo haberse perdido en el trayecto.

Dentro de esta gestión de datos, está inmersa las herramientas que permiten hacer dicha gestión, estos son los instrumentos y formularios de recolección de datos, protocolo de gestión, mecanismos y formas de control de la calidad de información, documentación de respaldo, instalaciones físicas de almacenamiento de la información, mecanismos de recuperación o de respaldo de la información[37].

*“El sistema de gestión de datos incluye la supervisión del flujo de datos desde los sujetos de investigación a los analistas de datos. Antes de poder analizarlos, los datos deben ser recogidos, revisados, codificados, computarizados, verificados, confirmados y convertidos a formularios adecuados para llevar a cabo el análisis. El proceso debe ser adecuadamente documentado para fundamentar el análisis e interpretación”*¹⁶

Para el caso particular de las mediciones eléctricas de un Smart Meter dentro de cualquier tipo de arquitectura, la gestión de datos hace referencia a la cantidad de medidas que se necesita según las circunstancias. Por ejemplo un Smart Meter ubicado en sectores lejanos de la ciudad, no necesita enviar todos los datos que tiene la capacidad de medirlos, tal vez sea necesario solo una lectura diaria de la mitad de los parámetros pues no será un sector donde el usuario tenga un monitoreo constante y requiera saber los datos de consumo y costos de energía en tiempo real, es aquí donde el término gestión se aplicará para programar al dispositivo de lectura y los equipos de comunicación para hacer una lectura al día, de tal forma no se satura la red de comunicaciones con valores que serán despreciados.

Por otra parte, si existe un Smart Meter ubicado dentro de la urbe, con dispositivos controlados vía remota, y su usuario puede gestionar dichas cargas entonces si se requiere una medición continua de todos los parámetros eléctricos enviados por el Smart Meter, puesto que si serán de utilidad para el usuario y para la empresa que suministra el servicio eléctrico.

Con lo anteriormente expuesto, la Figura 40 muestra la relación directa del costo en función de la cantidad de datos que serán medidos y el ancho de banda necesario. Mientras más parámetros eléctricos se envíen mayor será el costo de la implementación de la red de comunicación puesto que utilizará mayor ancho de banda, mayor tamaño en los servidores de almacenamiento, mayor administración de la información entre otros aspectos.

¹⁶ Gestì, L., & Arrighi, M. (2004). 16. Gestión y análisis de datos *, 523–551.

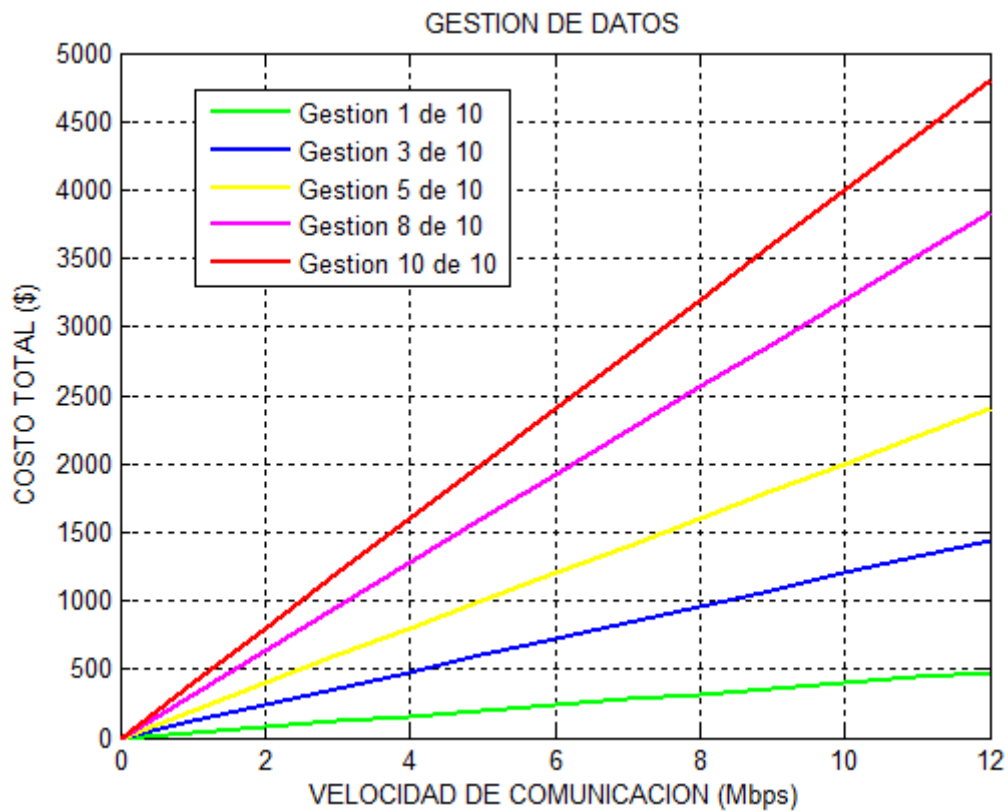


Figura 40: Administración de cantidad de valores a obtener del Smart Meter en función de la velocidad de comunicación.

Fuente: Autor.

Por su parte la Figura 41 presenta la variación del costo en función de la cantidad de mediciones y del número de concentradores, por lo que se puede notar que mientras mayor sea la cantidad de datos medidos y muchos sean los Smart Meters dentro de la Smart Grid el costo crecerá proporcionalmente a estas variables.

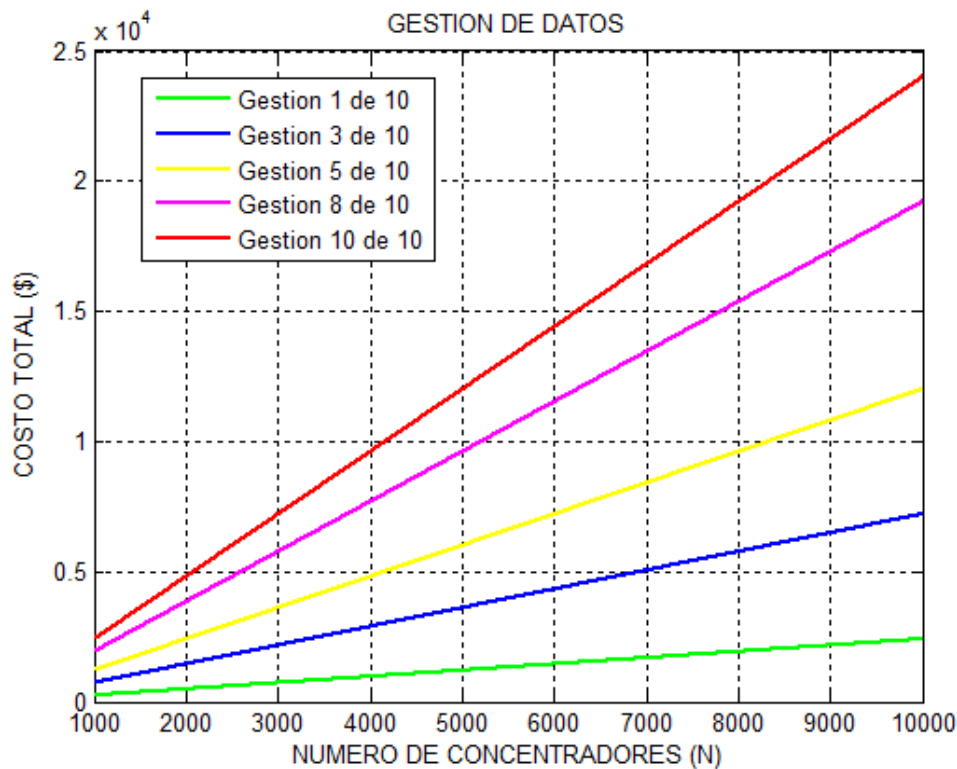


Figura 41: Administración de cantidad de valores a obtener del Smart Meter en función del número de concentradores conectados a la red.

Fuente: Autor.

Si en ambos casos, es decir en las condiciones de las Figuras 40 y 41, se asumirían que se tomaran 5 de las 10 posibles medidas que envía el Smart Meter serían los datos suficientes para una gestión y almacenamiento racional de información así como a su vez un dimensionamiento menor de menor capacidad para la red de comunicación, que en las dos opciones se ven reflejados en menor costo sin sacrificar parámetros eléctricos de importancia general, como lo son Voltaje, Corriente, Potencia Activa o Real, Frecuencia y Tiempo.

Finalmente, se debe recordar que un MDMS es una base de datos que realiza el almacenamiento y gestión de datos a largo plazo para las grandes cantidades de datos y eventos de uso. Con lo cual es posible una interacción con los sistemas de operación y gestión, incluyendo el sistema de gestión de interrupciones, el sistema de información geográfica, sistema de información al consumidor que gestiona la facturación de servicios y la información del cliente, el sistema de gestión de la distribución que proporciona una gestión de calidad de energía y la carga de pronóstico basado en los datos del medidor. Para todo este proceso es necesario filtrar los datos que realmente son necesarios para cada aplicación o zona según las condiciones económico-geográficas de los usuarios[38].

CAPÍTULO IV

INDICADORES, RESULTADOS PARA VISUALIZAR EL COMPORTAMIENTO DE UN MDMS:

En este capítulo se bosquejan los valores básicos o mínimos necesarios para los componentes más importantes de la Smart Grid, además los valores de cada arquitectura puesto que su comportamiento depende de la topología de cada una de ellas.

Sin profundizar en los cálculos puesto que ello representaría un análisis que no corresponde al tema principal de esta investigación.

Por último se expone las posibles mejoras que se pueden hacer a este estudio y los puntos de vista que no han sido tratados en esta ocasión.

4.1 Dimensionamiento de la red de comunicación

Dentro de una Smart Grid, es necesario identificar todos los procesos que atravesará la información que se han de medir con los Smart Meter, para lo cual se debe detectar en primer lugar el tipo y la velocidad de comunicación de los dispositivos inteligentes, el tamaño o peso de información enviada, tipo de arquitectura que se desea dimensionar, si el caso aplica los valores despreciables y la frecuencia de mediciones, entre otros aspectos de valoración. Por lo tanto se empezará el análisis según el tipo de arquitectura y sus características propias de cada una de ellas.

Por lo general se utiliza una comunicación no cableada entre el Smart Meter y el concentrador, pero para la comunicación del concentrador hacia la central MDMS se utiliza una comunicación por radio frecuencia, GSM, o cableada que podría ser cable de red, cable eléctrico o fibra óptica, según las necesidades y prestaciones físicas, geográficas y ambientales[39].

Haciendo referencia a los Smart Meter existentes en el mercado, como valores estándar, equipos que envían información de 200 bytes y se comunican a una velocidad entre 9,6 a 38,4 Kbps[40].

En base a estas características mencionadas se procede a generar un dimensionamiento básico de los valores mínimos necesarios para la implementación de una red de comunicación inteligente. La finalidad de estos cálculos es dar una idea general de valores aproximados de cada etapa, no consiste en un dimensionamiento basado en un estudio profundo, puesto que eso sería tema de otro estudio.

4.1.1 Dimensionamiento de la Arquitectura Centralizada

En base a la Figura 6, como en todo el proceso de esta investigación se omite la comunicación existente entre el Smart Meter y el concentrador, por estar relativamente cerca, además que el Smart Meter posee una variedad de formas de comunicación que podrían ser de bajo costo y optimizando los recursos de comunicación[1].

Por otra parte existe una comunicación directa entre el concentrador y la central MDMS, donde se procesarán todos los datos de información recolectados por el concentrador. Si cada Smart Meter envía un valor aproximado de 200 bytes por cada lectura y se asume que cada concentrador estará conectado a 100 Smart Meters, se puede calcular fácilmente que cada concentrador tendrá la sumatoria de todos ellos que será aproximadamente 20000 bytes, es decir 20 Kb. Esto deberá ser enviado en un tiempo menor a los 15 minutos, puesto que cada Smart Meter enviará sus nuevas mediciones en el transcurso de ese tiempo.

Por lo tanto si se hace un barrido selectivo y se toma en cuenta los valores promedios de latencia en el envío de la información se podrá calcular que cada Smart Meter envía sus datos en 6 segundos, esto por la cantidad aproximada de dispositivos en el concentrador se tendría 100 Smart Meter en 10 minutos. Lo cual es correcto puesto que debe ser inferior a 15 minutos. Entonces la velocidad de comunicación sería[41]:

$$V_{C1} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$
$$V_{C1} = \frac{200b}{6s} = 33bps$$
$$V_{C1} = 33bps \times 100SM = 3.3Kbps$$

Este valor de 3,3 Kbps, sería la velocidad de comunicación mínima entre los Smart Meter y los concentradores, considerando que la comunicación de un Smart Meter es en doble dirección, este valor deberá ser considerado según el nivel de interacción que se pretenda tener con el usuario.

Resta por considerar la velocidad de comunicación que deberá existir entre el concentrador y el MDMS centralizado, que tendrá la sumatoria de todas las medidas de los Smart Meters. Pero en este tramo se tiene la interacción de muchos concentradores de tal forma que se tendrá:

$$V_{C2} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{c2} = \frac{20Kb}{900s} = 22.2bps$$

$$V_{c2} = 22.2bps \times 6440concentradores = 143Kbps$$

El valor de la velocidad de comunicación desde los concentradores hacia el MDMS central será de 143Kbps como mínimo, puesto que en el ejemplo desarrollado se tenía para la ciudad de Quito-Ecuador un aproximado de 6440 concentradores.

El tiempo de medida considera que cada concentrador refrescará su información cada 15 minutos, suponiendo el ideal que no existe ningún retraso en la comunicación.

4.1.2 Dimensionamiento de la Arquitectura Distribuida

El criterio de análisis para esta arquitectura será semejante, sin embargo hay otros componentes que se deben considerar. El trayecto de los Smart Meters a su concentrador tendrá el mismo valor[41]:

$$V_{D1} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{D1} = \frac{200b}{6s} = 33.33bps$$

$$V_{D1} = 33bps \times 100SM = 3.3Kbps$$

Ahora haciendo el cálculo desde el concentrador hacia el MDMS distribuido se tendría:

$$V_{D2} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{D2} = \frac{20Kb}{900s} = 22.2bps$$

$$V_{D2} = 22.2bps \times 1610concentradores = 35.8Kbps$$

Como se puede ver la velocidad disminuyó en 4 veces su valor, esto se debe a que se asumió que en la ciudad de Quito-Ecuador existirían 4 MDMS distribuidos, por lo tanto el número de concentradores ya no van hacia un solo MDMS, sino que se reparten entre 4 sectores diferentes de la ciudad.

Finalmente, queda por calcular la velocidad de comunicación necesaria desde el MDMS distribuido hacia el MDMS central. Que según el mismo criterio quedaría de la

siguiente manera:

$$V_{D3} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{D3} = \frac{20Kb}{43200s} = 0.46bps$$

$$V_{D3} = 0.46bps \times 1610 \text{concentradores} = 0,74Kbps$$

El tiempo considerado para esta comunicación es que se lo realice dos veces al día, por lo tanto necesitará una velocidad muy baja frente a las anteriores.

4.1.3 Dimensionamiento de la Arquitectura Totalmente Distribuida.

La arquitectura de comunicación totalmente distribuida envía la información desde los Smart Meters hacia los concentradores, a su vez los concentradores hacia un Centro de Operaciones Distribuido y finalmente del Centro de Operaciones Distribuido se comunica hacia el Centro de Operaciones Principal.

Por lo tanto existen tres trayectorias para las cuales se necesita hallar la velocidad de cada una. Considerando los mismos criterios que se ha manejado se tiene que la velocidad entre el Smart Meter y el concentrador será[41]:

$$V_{TD1} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{TD1} = \frac{200b}{6s} = 33bps$$

$$V_{TD1} = 33bps \times 100SM = 3.3Kbps$$

Por su parte la velocidad desde los concentradores hacia Centro de Operaciones Distribuido será:

$$V_{TD2} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{TD2} = \frac{20Kb}{900s} = 22.2bps$$

$$V_{TD2} = 22.2bps \times 1610 \text{concentradores} = 35.8Kbps$$

A continuación se tiene la comunicación desde Centro de Operaciones Distribuido hacia Centro de Operaciones Principal, en la que la comunicación será una vez al día, por lo tanto la velocidad deberá ser menor que todas las anteriores:

$$V_{TD3} = \frac{\text{Peso de la información}}{\text{tiempo de medida}}$$

$$V_{TD3} = \frac{20Kb}{86400s} = 0.23bps$$

$$V_{TD3} = 0.23bps \times 1610concentradores = 0,37Kbps$$

4.2 Dimensionamiento del Servidor

El término servidor implica una extensa variedad de posibilidades dentro del campo de la informática, pero en este caso se refiere a un Servidor de Archivos, el cual registra, comprime y almacena la información a él enviada, es un servidor que sirve también como base de datos dentro de una red, que para este caso resulta ser una Smart Grid.

En este caso se dimensionará el servidor para almacenar información de un día, lógicamente las capacidades de almacenamiento y procesador de datos para gestionar las peticiones del usuario deben ser muy altas en función de la cantidad de información que deberán almacenar.

Para la Arquitectura de Comunicación Centralizada deberá poseer un servidor que pueda gestionar el cúmulo de medidas durante 24 horas. En este caso será de 10 Tera bytes. Este valor se obtiene del peso de información por las 96 mediciones que registrará en un día. Luego ésta información podrá ser comprimida y gestionada según las necesidades de la Empresa de Energía Eléctrica estime conveniente. Para lo cual se utiliza una base de datos donde se registran los archivos para futuras aplicaciones o uso de la información.

Pasando a la Arquitectura de Comunicación Distribuida, se requiere de varios servidores ubicados en los MDMS distribuidos, que para el caso de los cálculos anteriores se tendrán 4 servidores distribuidos. En este caso será de 3 Tera bytes cada uno. Este valor se obtiene del peso de información por las 96 mediciones que registrará en un día. Pero el servidor del centro de operaciones podrá ser de menor capacidad puesto que gran parte de la gestión será realizada en los centros MDMS Distribuidos y además recibe información dos veces al día, por lo que se podría dimensionar un servidor de 1 Tera bytes.

Por último en la Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida se podrían manejar los mismos parámetros que la arquitectura anterior, con la salvedad que el servidor del centro de operaciones tendrá características más simples que los anteriores

ya que su almacenamiento y gestión sucede una vez al día y solo llegan a él datos muy relevantes. En tal virtud, también se podría dimensionar un servidor de 1 Tera bytes, considerando que podría estar sobredimensionado.

4.3 Dimensionar los registros de la Base de Datos

La base de datos permite almacenar información que ha sido previamente gestionada y comprimida por el servidor, para un entendimiento más claro, el servidor registrará toda la información que recibe desde los concentradores, aquí se podría desechar la información que no es importante y a su vez comprimir la información restante.

Después de archivar la información en la base de datos, mediante configuración informática será posible volver a comprimir la información más antigua y sacar más respaldos de los datos recientes.

De manera que, se puede asumir que los servidores de base de datos, serán tres veces más grandes que la capacidad de los servidores ubicados en los MDMS's, es decir de 30 Tera bytes.

Nótese que todos estos valores no han sido sujetos a un análisis detallado, puesto que la finalidad de estos dimensionamientos es tener una idea global de valores aproximados que intervienen en cada tramo de la red inteligente.

4.4 Proyección de desarrollo del proyecto

Para trabajos futuros se podría tomar la perspectiva del costo-beneficio para evaluar cuán rentable sería para una empresa suministradora del servicio eléctrico hacer el cambio de todos los medidores eléctricos análogos existentes en el país y cambiarlos por Smart Meter, para modificar así también la toma de lecturas mensuales y además gestionar el recurso eléctrico. Sin dejar de lado el tiempo de recuperación de la inversión, puesto que las tecnologías necesarias para este cometido serán costosas pero de prestaciones incomparables con el sistema actual de medición de energía eléctrica.

Se sugiere hacer un análisis exhaustivo de cada arquitectura por separado, para profundizar en todos los detalles y temas eléctricos de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), su generación, transporte y distribución de la energía eléctrica y los sistemas de comunicación y almacenamiento que se dispongan en el país, de tal forma que la investigación estaría orientada hacia la futura transformación de la matriz energética de

la nación.

Finalmente, en vista de la escasa innovación tecnológica que posee el país, se muestra como inalcanzable una migración del sistema tradicional de medición hacia nuevas eras tecnológicas, sin embargo, planes pilotos y pruebas de escala considerable pueden mostrar la capacidad y costo de la nueva generación energética y de Smart Grid[42].

CONCLUSIONES

1. Después de realizar las simulaciones de las Arquitecturas de comunicación en función del costo de implementación, que dependiendo del tamaño de la red, es decir número de usuarios, se puede determinar cuál de las tres arquitecturas es conveniente para su implementación. La Arquitectura centralizada puede resultar conveniente para ciudades con mayor de 2 millones de habitantes. A su vez las arquitecturas distribuida y totalmente distribuida presentan un costo semejante sin importar demasiado el número de habitantes, sino más bien atiende a la topología, distribución geográfica e infraestructura entre otras.
2. El modelamiento de las arquitecturas en su conjunto muestran que dependiendo del número de usuarios y su futura prospección, se puede determinar cuál de las tres sería la mejor para cada caso particular, es preciso mencionar que la arquitectura que presenta un punto intermedio de costos, ancho de banda necesario y flexibilidad para su gestión de datos resulta ser la Arquitectura de Comunicación Distribuida, esto se puede concluir debido a que acepta una escalabilidad del sistema.
3. De acuerdo con la investigación y la variación de la cantidad de datos medidos se puede afirmar que como promedio cada Smart Meter envía 120 bytes de datos en cada lectura, según la marca y origen de fabricación. Por normativas y estándares mundiales las lecturas de un Smart Meter pueden ser enviadas cada 15 minutos, sin embargo pueden ser enviados en menor tiempo.
4. Es muy importante tomar el valor de la velocidad de comunicación del Smart Meter, pues de este equipo se determinará el ancho de banda necesaria para la red desde los Smart Meters hacia los concentradores. De igual forma desde los concentradores hacia los centros de operaciones o MDMS distribuidos, puesto que la velocidad de la red dependerá del medio de transporte de la información y las velocidades de comunicación de los concentradores.
5. Las herramientas de compresión que se disponen en la actualidad son funciones de análisis de datos, en este caso la función Wavelet permite

comprimir los datos de medición tales como Voltaje, Corriente, Frecuencia, Potencia y demás parámetros eléctricos que puede sensar el Smart Meter. Esta compresión de datos tiene la potencialidad de bajar el peso del dato enviado y luego de llegar a su destino poder volver a descomponerse en los valores originales para la obtención de datos y su posterior análisis y gestión. Esta información comprimida puede utilizarse para el transporte de la información y para su almacenamiento, pero puede ser descompuesto para la gestión inmediata en tiempo real o en previsiones futuras.

6. Dentro de las arquitecturas de comunicación, la Arquitectura de Comunicación Distribuida resulta ser quien más consume el ancho de banda en función de la distancia.
7. Haciendo referencia al costo en función de la distancia promedio, el resultado de la simulación arroja que la Arquitectura de Comunicación Totalmente Distribuida es la menos económica.
8. Fijando la vista en la gestión de datos, el costo final depende de la cantidad de parámetros eléctricos que se necesita medir, de tal forma que se pueda proyectar la capacidad de memoria en los servidores y la velocidad de comunicación o ancho de banda de la red.

RECOMENDACIONES

1. Las formulaciones que son la base para las simulaciones deberán tener un análisis dimensional, esto permitirá tener la certeza tanto para el autor como para los lectores, que estarán basadas en datos correctos y reales.
2. Se recomienda desarrollar una evaluación económica del costo de implementación de cada una de las arquitecturas aquí planteadas, para después considerar el costo de crecimiento y escalabilidad. Tal vez la evaluación final, que consisten en la suma de implementación más la escalabilidad, resulte ser más conveniente aunque las inversiones iniciales sean más costosas.
3. Cada fabricante de Smart Meter desarrolla sus equipos según criterios propios, muy ventajoso sería para el mundo eléctrico que se manejen estándares de construcción, esto sobre todo para la comunicación, parámetros de medida y el peso de la información, así como los métodos de comunicación más globales y adaptables.
4. Dentro del ámbito de las comunicaciones existe mucha variedad de métodos de transmisión de datos, por lo tanto sería recomendable una comparación tecno-económica de la implementación de por lo menos en tres métodos, radio frecuencia, cable de datos y fibra óptica. Esta evaluación también influirá en el costo final de la implementación de una de las arquitecturas de comunicación.
5. Se recomienda un cálculo del ancho de banda necesario para la transmisión de datos comprimidos, según el análisis y simulación realizada en el presente documento existe una disminución de las señales o valores medidos de aproximadamente un 40%, lo cual ha sido considerado solo como datos medidos desde el Smart Meter, mas no como el envío hasta un centro de operaciones, MDMS distribuidos o centro de operaciones distribuidos de cualquier arquitectura. Esto afectará no solo el dimensionamiento del ancho de banda sino además al costo de la implementación para una red de comunicación con menores prestaciones.

6. La gestión de datos medidos no solo debería aplicar cuántos de todos serán utilizados o almacenados, sino que se recomienda hacer un barrido de un grupo de Smart Meters, estos a su vez tendrán una sincronización de comunicación para no enviar información en momentos no solicitados por los concentradores. Este mismo criterio sería aplicable para los centros de operaciones, MDMS distribuidos o centro de operaciones distribuidos, para la sincronización de todos los componentes de la red.

REFERENCIAS

- [1] G. Barai and K. Raahemifar, "Optimization of distributed communication architectures in advanced metering infrastructure of smart grid," *2014 IEEE 27th Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, May 2014.
- [2] D. P. Chandima, *APPLIED SCIENCES AND TECHNOLOGY Smart Metering Design and. .*
- [3] N. Lu, P. Du, X. Guo, and F. L. Greitzer, "Smart Meter Data Analysis," pp. 1–6, 2012.
- [4] J. R. I. Pedrasa, L. V. Iii, M. L. Dumlao, and M. A. A. Pedrasa, "Design and Implementation of an AMI Emulator for User Feature Studies," pp. 366–371, 2014.
- [5] D. In, "Cooperative Transmission for Meter Data Collection in Smart Grid," no. April, pp. 90–97, 2012.
- [6] E. Of, T. H. E. Electricity, N. Towards, S. Grid, I. N. The, and A. Region, "EVOLUTION OF THE ELECTRICITY NETWORKS TOWARDS SMART GRID," vol. 8, pp. 48–61, 2013.
- [7] T. Baldwin, D. Kelle, S. Member, J. Cordova, and N. Beneby, "Fault Locating in Distribution Networks with the Aid of Advanced Metering Infrastructure," pp. 1–8, 2014.
- [8] B. Karimi, V. Namboodiri, and M. Jadliwala, "On the scalable collection of metering data in smart grids through message concatenation," *2013 IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 318–323, Oct. 2013.
- [9] "CONELEC CalidadDeServicio." .
- [10] A. K. Ehrhardt-martinez and K. A. Donnelly, "Advanced Metering Initiatives and Residential Feedback Programs : A Meta-Review for Household Electricity-Saving Opportunities," 2010.
- [11] L. Zheng, Q. Lu, W. Hu, and Y. Huang, "Research of Energy Information Management Center based on AMI," *2012 47th Int. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–5, Sep. 2012.
- [12] J. Zhou, R. Q. Hu, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid," vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [13] R. Q. Hu, J. Zhou, and S. Member, "Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid Scalable Distributed Communication Architectures to Support Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid," 2012.

- [14] G. N. Hoang, L. Liquori, and H. N. Chan, "A Scalable Communication Architecture for Advanced Metering Infrastructure," 2013.
- [15] M. M. Rahman and A. Mto, "Technologies required for efficient operation of a smart meter network," *2011 6th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 809–814, Jun. 2011.
- [16] E. O. Oladeji, E. N. Onwuka, and M. A. Aibinu, "Determination of Voice Traffic Busy Hour and Traffic Forecasting in Global System of Mobile Communication (GSM) in Nigeria," no. November, pp. 184–189, 2013.
- [17] G. S. M. P. Hase, A. I. Re, and P. Rotocols, "Gsm p hase 2+ general packet radio service gprs: arch itectu re, p rotocols, and air interface," vol. 2, no. 3, pp. 2–14, 1999.
- [18] Y. S. Rao, W. Yeung, and A. Kripalani, "Third-Generation (3G) Radio Access Standards," 1988.
- [19] L.-C. Tsai, "Bandwidth enhancement in coplanar waveguide-fed slot antennas designed for wideband code division multiple access/wireless local area network/worldwide interoperability for microwave access applications," *IET Microwaves, Antennas Propag.*, vol. 8, no. 10, pp. 724–729, Jul. 2014.
- [20] C. Making, "Bienvenidos a la IEC," in *COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL*, vol. 131, 2011, p. 131.
- [21] D. E. Purcell, "The Strategic Value of Standards Education Table of Contents," *The Strategic Value of Standards Education*, no. August, pp. 40–48, 2008.
- [22] S. Barker, S. Member, S. Kalra, and D. Irwin, "and Analysis of Smart Meter Data," vol. 32, no. 7, pp. 1312–1327, 2014.
- [23] O. Industrial, "SMART GRIDS Y LA EVOLUCIÓN DE LA RED," pp. 1–82, 2011.
- [24] S. Rohjans, M. Uslar, R. Bleiker, J. Gonzalez, M. Specht, T. Suding, and T. Weidelt, "Survey of Smart Grid Standardization Studies and Recommendations," *2010 First IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun.*, pp. 583–588, Oct. 2010.
- [25] S. Srinivasan, "IEEE ISGT Asia 2013 1569818259 Integration of IEC 61850 and OPC UA for Smart Grid Automation," pp. 1–5, 2013.
- [26] P. K. C. Wong and R. Barr, "22 nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm , 10-13 June 2013 Paper 0279 A ' BIG DATA ' CHALLENGE – TURNING SMART METER VOLTAGE QUALITY DATA INTO ACTIONABLE INFORMATION CONSEQUENCES COMPLIANCE OF VOLTAGE NON DESIGN OF THE DISTRIBU," no. 0279, pp. 10–13, 2013.

- [27] N. Tangsunantham and C. Pirak, "Voltage unbalance measurement in three-phase smart meter applied to AMI systems," *2013 10th Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Telecommun. Inf. Technol.*, pp. 1–5, May 2013.
- [28] S. Feng, L. Zhu, and Z. Liu, "The Zero Line Current Transformer in Smart Meter," *2012 Int. Conf. Comput. Sci. Electron. Eng.*, pp. 269–272, Mar. 2012.
- [29] P. Dimitriou, T. Leber, N. Nagele, L. Temmel, and C. Tessarek, "As part of smart grids metering system," no. January 2013, pp. 350–355, 2014.
- [30] M. A. Shree and D. P. Vadana, "Smart meter for power factor enhancement in real-time," *2014 Int. Conf. Embed. Syst.*, no. Ices, pp. 177–181, Jul. 2014.
- [31] A. De Domenico, E. C. Strinati, and M. Di Benedetto, *Cognitive Strategies for Green Two-Tier Cellular Networks: A Critical Overview*. 2015.
- [32] P. Issn, "Caracterización mediante wavelets de electrocardiogramas para efectos de compresión y clasificación de cardiopatías," no. 32, pp. 155–158, 2006.
- [33] R. Arturo and T. Codorníu, "Compresión , basada en Wavelets , de modelos digitales de elevaciones Wavelet-based Compression for Digital Elevation Models," pp. 27–48, 2012.
- [34] M. P. Tcheou, L. Lovisolo, M. V Ribeiro, S. Member, E. A. B. Silva, M. A. M. Rodrigues, J. M. T. Romano, and P. S. R. Diniz, "The Compression of Electric Signal Waveforms for Smart Grids : State of the Art and Future Trends," vol. 5, no. 1, pp. 291–302, 2014.
- [35] C. P. Pichincha, "Fascículo provincial pichincha," *FASCÍCULO Prov. PICHINCHA*, pp. 0–7, 2010.
- [36] C. Larrea, "ATLAS SOCIAL PARA QUITO URBANO."
- [37] L. Gesti and M. Arrighi, "16. Gestión y análisis de datos *," pp. 523–551, 2004.
- [38] Z. Wan, G. Wang, Y. Yang, and S. Shi, "SKM: Scalable Key Management for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 12, pp. 7055–7066, Dec. 2014.
- [39] S. Garlapati, R. M. Vaghefi, M. R. Buehrer, and H. Reed, "No Title," pp. 1–4, 2012.
- [40] C. De Neutro, "Smart METER," 2013.
- [41] "Behrouz Forouzan-Transmisión de datos y redes de comunicaciones-McGraw Hill (2002).pdf." .
- [42] E. Mauricio and I. Ortega, "Redes de Comunicación en Smart Grid," pp. 36–55, 2012.

ANEXOS

ANEXO A
COMPRESIÓN DE INFORMACIÓN PARA ENVÍO A BASE DE DATOS

```

% COMPRESION DE INFORMACION PARA ENVIO A BASE DE DATOS
a= xlsread('DATOSCOMPRESION.xlsx', 1,'B7:J7');
ls=length (a);

[thr,sorh,keepapp] = ddencmp('den','wv',a);
compresion = wdencmp('gbl',a,'db3',2,thr,sorh,keepapp);
subplot(211)
plot(a, 'r'); title('DATOS MEDIDOS');
grid on;
legend ('9 DATOS LEIDOS')
subplot(212);
plot(compresion, 'g'); title('DATOS COMPRIMIDOS')
grid on;
legend ('9 DATOS COMPRIMIDOS')

% Grafica Area de Análisis - Ventana
% Perform one step decomposition of 's' using 'db1' (Haar bases)
[ca1,cd1] = dwt(a,'db4');
% Perform one step reconstruction from coefficients 'ca1' and 'cd1'.
a1 = upcoef('a',ca1,'db4',1,ls);
d1 = upcoef('d',cd1,'db4',1,ls);
title('DATOS COMPRIMIDOS');
grid on
%=====
% Grafica los coeficientes con las Frec Bajas y Frec Altas
% Aplica la Transformada inversa de Wavelet IDWT
figure(3)
subplot(211)
plot(a1)
title('Coeficientes a1 - Señal Madre - Frec Bajas');
grid on
subplot(212)
plot(d1)
title('Coeficientes d1 - Ruido - Frec Altas');
% Invert directly decomposition of 's' using coefficients.
a0 = idwt(ca1,cd1,'db4',ls); % Transformada Discreta Inversa
grid on
%=====
% Decomposición de la seña a un nivel 3 con db
% Usando appcoef realiza una 1-D approximation coefficients
% Luego obtiene 1-D detail coefficients usando detcoef
% Reconstruye la señal con wrcoef - Reconstruct single branch from 1-D
wavelet coefficients
% Finalmente Multilevel 1-D wavelet reconstruction
figure(4)
plot(a0)
title('RECUPERACION DE MEDIDIAS ORIGINALES');
grid on
legend ('9 DATOS RECUPERADOS')
% Perform decomposition at level 3 of 's' using 'db1'.
[c,l] = wavedec(a,3,'db4');
% Extract approximation coefficients at level 3
% from wavelet decomposition structure [c,l].
ca3 = appcoef(c,l,'db4',3);
% Extract detail coefficients at levels 1, 2 and 3,
% from wavelet decomposition structure [c,l].
cd3 = detcoef(c,l,3);
cd2 = detcoef(c,l,2);

```

```

cd1 = detcoef(c,l,1);
% Reconstruct approximation at level 3,
% from wavelet decomposition structure [c,l].
a3 = wrcoef('a',c,l,'db4',3);
% Reconstruct detail coefficients at levels 1,2 and 3,
% from the wavelet decomposition structure [c,l].
d3 = wrcoef('d',c,l,'db4',3);
d2 = wrcoef('d',c,l,'db4',2);
d1 = wrcoef('d',c,l,'db4',1);
% Reconstruct 's' from the wavelet decomposition structure [c,l].
a0 = waverec(c,l,'db4');

%OBTENCION DE DATOS EN TEXTO
informacion=fopen ('OBTENCION.txt','wt')
fprintf(informacion, '\n%d', a);
winopen ('OBTENCION.txt')

```

ANEXO B
COSTO DE LAS ARQUITECTURAS EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE
CONCENTRADORES


```

% COSTO DE ARQUITECTURAS
clc, clear

% t = input ('Ingrese el valor de tasa de envio Centralizado = ') %12
Mbps
% T = input ('Ingrese el valor de tasa de envio Distribuido = ')
%.12 Mbps
% d = input('Ingrese distancia Centralizada = ') %50 km
% D = input('Ingrese distancia promedio = ') %40 km

N = 1000:1:10000;
t = 12; % Mbps
T = .12; % Mbps
d = 60; % Km
D = 40; % Km
B = 100; % Mbps x Km / $
F = 1000000; % $
FP = 100000; % $
a = 0.1; % #
AB = 100; % Ancho de banda sugerido 100 Mbps

% Formulas
DAT1 = (T*D*N)/B;
DAT2 = (AB*D)/B;

% CostoC = ' ((t*D*N)/B)+F';
% CostoD = ' ((DAT1.^2/3)*(FP.^1/3))+(DAT1)';
% CostoF = ' (DAT1.^2/3)*((DAT2+FP).^1/3)';

CostoC = ' ((t*d*N)/B)+F';
CostoD = ' ((DAT1.^2/3)*(FP.^1/3))+(a*DAT1)';
CostoF = ' ((DAT1.^2/3)*((DAT2+FP).^1/3))';

x = eval (CostoC);
y = eval (CostoD);
z = eval (CostoF);

plot (N, x, 'r'), grid on
hold on
plot (N, y, 'g'), grid on
hold on
plot (N, z, 'm'), grid on
hold on

title ('COSTO DE ARQUITECTURAS POR CONCENTRADORES');

xlabel ('NUMERO DE CONCENTRADORES (N)');
ylabel ('COSTO TOTAL ($)');
% legend ('Arquitectura Centralizada')
% legend ('Arquitectura Distribuida')
% legend ('Arquitectura Totalmente Distribuida')
legend ('Arquitectura Centralizada','Arquitectura
Distribuida','Arquitectura Totalmente Distribuida')

```

ANEXO C
ANCHO DE BANDA POR KILÓMETRO, EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE
CONCENTRADORES

```

% ANCHO DE BANDA POR KILOMETRO EN FUNCION DE NUMERO DE CONCENTRADORES
clc, clear

% t = input ('Ingrese el valor de tasa de envio = ')    %12 Mbps
% T = input ('Ingrese el valor de tasa de envio Promedio = ')    %.12
Mbps
% d = input('Ingrese distancia Centralizada = ')    %100 km
% D = input('Ingrese distancia promedio = ')    %40 km

N = 1000:1:10000;
t = 12;          % Mbps
T = .12;         % Mbps
d = 80;          % Km
D = 40;          % Km
FP = 100;        % Costo Promedio de MDMS $
a = 0.1;         %Constante de
AB = 100;        %Ancho de banda sugerido Mbps
B = 100;         % Mbps x Km / $

% FORMULAS CENTRALIZADA
DAT0 = t*d*N;
% DAT20 = T*D*N;

% FORMULAS DISTRIBUIDA
DAT1 = T*D*N;
DAT2 = DAT1.^2/3;
DAT3 = (FP*B).^1/3;
DAT4 = DAT2*DAT3;
DAT5 = DAT4 + (DAT1*a);
% DAT21 = ((DAT20).^2/3)*((FP*B).^1.3)+(a*DAT20);

% FORMULAS TOTALMENTE DISTRIBUIDA
DAT6 = DAT1.^2/3;
DAT7 = (AB*B*D)+FP;
DAT8 = (B/DAT7).^2/3;
DAT9 = (DAT7/B).^1/3;
DAT10= (AB*D*DAT8)+DAT9;
DAT11= DAT6*DAT10;

% DAT22 = ((T*D*N).^2/3)+(AB*D*((B/DAT7).^2/3)+(DAT7/B).^1/3);

% SOLUCION DE DATOS
ABDPC = 'DAT0';
ABDPD = 'DAT5';
ABDPF = 'DAT11';

% ABDPC = 'DAT20';
% ABDPD = 'DAT21';
% ABDPF = 'DAT22';

x = eval (ABDPC);
y = eval (ABDPD);
z = eval (ABDPF);

plot (N, x, 'r'), grid on
hold on
plot (N, y, 'g'), grid on
hold on
plot (N, z, 'm'), grid on

```

```
hold on

title ('VALOR ABDP POR CONCENTRADORES');

xlabel ('NUMERO DE CONCENTRADORES (N) ');
ylabel ('VALOR ABDP');
% legend ('Arquitectura Centralizada')
% legend ('Arquitectura Distribuida')
% legend ('Arquitectura Totalmente Distribuida')
legend ('Arquitectura Centralizada','Arquitectura
Distribuida','Arquitectura Totalmente Distribuida')
```

ANEXO D
COSTO EN FUNCIÓN DEL VALOR DE VELOCIDAD PROMEDIO DE
COMUNICACIÓN

```

% COSTO EN FUNCION DE LA TAZA PROMEDIO DE VELOCIDAD DE COMUNICACION
clc, clear

% D = input('Ingrese distancia promedio = ')    %40 km

N = 1000;
T = 0:1:14;
D = 40;    % Km
FP = 100;  % Costo Promedio de MDMS
a = 0.1;   %Constante de transmision
AB = 100;  %Ancho de banda sugerido 100 Mbps
B = 100;   %Velocidad de datos por KM

DAT1 = (T*D*N)/B;
DAT2 = (AB*D)/B;

CostoD = ' ((DAT1.^2/3)*(FP.^1/3))+(a*DAT1) ';
CostoF = ' (DAT1.^2/3)*((DAT2+FP).^1/3) ';

y = eval (CostoD);
z = eval (CostoF);

plot (T, y, 'g'), grid on
hold on
plot (T, z, 'm'), grid on
hold on

title ('COSTO POR VELOCIDAD DE TRANSMISION');

xlabel ('VELOCIDAD DE COMUNICACION (Mbps)');
ylabel ('COSTO TOTAL ($)');
% legend ('Arquitectura Distribuida')
% legend ('Arquitectura Totalmente Distribuida')
legend ('Arquitectura Distribuida','Arquitectura Totalmente
Distribuida')

```

ANEXO E
COSTO EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA PROMEDIO

```

% COSTO EN FUNCION DE LA DISTANCIA PROMEDIO
clc, clear

N = 1000;
T = 5;
D = 20:5:100;    %40 km
DD= 20:5:100;
FP = 100; % Costo Promedio de MDMS
a = 0.1; %Constante de
AB = 100; %Ancho de banda sugerido 100 Mbps
B = 100; %Velocidad de datos por KM

% Formulas
DAT1 = (T*D*N)/B;
DAT2 = (AB*DD)/B;
DAT3 = (DAT1.^2/3);
DAT4 = ((DAT2+FP).^1/3);
DAT5 = DAT3.*DAT4;

CostoD = ' ((DAT1.^2/3)*(FP.^1/3))+(a*D*DAT1) ';
CostoF = 'DAT5';

y = eval (CostoD);
z = eval (CostoF);

plot (D, y, 'g'), grid on
hold on
plot (D, z, 'm'), grid on
hold on

title ('COSTO POR DISTANCIA PROMEDIO');

xlabel ('DISTANCIA (Km)');
ylabel ('COSTO TOTAL ($)');
% legend ('Arquitectura Distribuida')
% legend ('Arquitectura Totalmente Distribuida')
legend ('Arquitectura Distribuida','Arquitectura Totalmente
Distribuida')

```


ANEXO F
GESTIÓN DE DATOS MEDIDOS Y ENVIADOS

```

% GESTION DE LOS DATOS FILTRADOS
clc, clear

% N = 1000;           % GESTION VARIANDO TAZA PROMEDIO
% T = 0:1:12;         % GESTION VARIANDO TAZA PROMEDIO
N = 1000:1:10000;    % GESTION VARIANDO CONCENTRADORES
T = 6;               % GESTION VARIANDO CONCENTRADORES
D = 40;              %40 km
FP = 100;            % Costo Promedio de MDMS
AB = 100;            %Ancho de banda sugerido 100 Mbps
B = 100;             %Velocidad de datos por KM
a1 = 0.1;
a2 = 0.3;
a3 = 0.5;
a4 = 0.8;
a5 = 1.0;

DAT1 = (T*D*N)/B;
DAT2 = (AB*D)/B;

% CostoD1 = ' ((DAT1.^2/3)*(FP.^1/3))+(a1*DAT1) ';
CostoD1 = '(a1*DAT1)';
CostoD2 = '(a2*DAT1)';
CostoD3 = '(a3*DAT1)';
CostoD4 = '(a4*DAT1)';
CostoD5 = '(a5*DAT1)';

y1 = eval (CostoD1);
y2 = eval (CostoD2);
y3 = eval (CostoD3);
y4 = eval (CostoD4);
y5 = eval (CostoD5);

% GESTION VARIANDO TAZA PROMEDIO
% plot (T, y1, 'g'), grid on
% hold on
% plot (T, y2, 'b'), grid on
% hold on
% plot (T, y3, 'y'), grid on
% hold on
% plot (T, y4, 'm'), grid on
% hold on
% plot (T, y5, 'r'), grid on
% hold on

% GESTION VARIANDO CONCENTRADORES
plot (N, y1, 'g'), grid on
hold on
plot (N, y2, 'b'), grid on
hold on
plot (N, y3, 'y'), grid on
hold on
plot (N, y4, 'm'), grid on
hold on
plot (N, y5, 'r'), grid on
hold on

title ('GESTION DE DATOS');

```

```

% xlabel ('VELOCIDAD DE COMUNICACION (Mbps)'); % GESTION VARIANDO TAZA
PROMEDIO
xlabel ('NUMERO DE CONCENTRADORES (N)'); % GESTION VARIANDO
CONCENTRADORES
ylabel ('COSTO TOTAL ($)');
legend ('Gestion 1 de 10','Gestion 3 de 10','Gestion 5 de 10','Gestion
8 de 10','Gestion 10 de 10')

```